

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-191-199

SEARCH FOR OPTIMAL SHIPPING ROUTES IN THE ARCTIC SEAS

E. V. Andreeva, A. L. Tezikov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

A method for choosing optimal shipping routes and determining the conditions under which the Northern Sea Route can be used year-round is developed in the paper. The topic and purpose of the study are directly related to the tasks, the implementation of which is provided by the Development Plan of the Northern Sea Route, approved by the decree of the Government of the Russian Federation on August 1, 2022, confirmed by the financing program for the development and implementation of the digital board of the Northern Sea Route, approved by the Government in mid-January, 2023. The assessment of the current state of the network of shipping routes, navigation, hydrographic and hydro meteorological support, as well as the structure and composition of the Arctic icebreaker and transport fleet is given. The main factors affecting the implementation of the year-round navigation program in the eastern sector of the Arctic include severe ice conditions, unreliable forecasts of the ice situation, the lack of a sufficient number of icebreakers and transport vessels capable of overcoming thick ice fields in the Arctic shallow waters. Based on the results of the review of existing methods for determining safe and cost-effective shipping routes, the basic requirements for methods of choosing optimal routes in the waters of the Arctic seas have been developed. Using the method of multi-criteria evaluation of alternative routes according to a variety of safety criteria depending on the navigation period and the method of transport vessels navigation in ice is justified. A list of information necessary for implementation of the developed multi-criteria method for finding optimal routes and a list of the main stages of its implementation have been compiled. The results of testing the method of comparative evaluation of alternative routes using a set of simulation models are presented. Recommendations on the use of the developed method are given. The main directions of further research are determined.

Keywords: Northern Sea Route, shipping routes, safety criteria, transit time, Pareto optimization, modeling.

For citation:

Andreeva, Ekaterina V., and Aleksandr L. Tezikov. "Search for optimal shipping routes in the Arctic seas." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 191–199. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-191-199.

УДК 528.47

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ СУДОХОДНЫХ МАРШРУТОВ В АКВАТОРИИ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена разработке метода выбора оптимальных судоходных маршрутов и определения условий, при которых Северный морской путь может быть использован круглогодично. Тема и цель исследования непосредственно связаны с задачами, реализация которых предусмотрена планом развития Северного морского пути, утвержденным распоряжением Правительства Российской Федерации 1 августа 2022 г., в соответствии с программой финансирования работ по созданию и внедрению цифровой платформы Северного морского пути, утвержденной Правительством в январе 2023 г. Дана оценка современного состояния сети судоходных маршрутов, навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения, а также структуры и состава арктического ледокольного и транспортного флота. Отмечается, что к основным факторам, оказывающим влияние на реализацию программы круглогодичной навигации в Восточном секторе Арктики, относятся тяжелые ледовые условия, недостоверные прогнозы ледовой обстановки, отсутствие достаточного количества ледоколов и транспортных судов, способных на арктическом мелководье преодолевать поля толстых льдов. По результатам обзора существующих методов определения безопасных и экономически выгодных судоходных маршрутов разработаны основные

требования к методам выбора оптимальных маршрутов в акваториях арктических морей. Обосновано использование метода многокритериальной оценки альтернативных маршрутов по множеству критериев безопасности, зависящих от навигационного периода и способа плавания транспортных судов во льдах. Составлен перечень информации, необходимой для реализации разработанного многокритериального метода поиска оптимальных маршрутов, и перечень основных этапов его реализации. Приведены результаты проверки метода сравнительной оценки альтернативных маршрутов с использованием набора имитационных моделей. Даны рекомендации по использованию разработанного метода. Определены основные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: Северный морской путь, судоходные маршруты, критерии безопасности, время перехода, Парето-оптимизация, моделирование.

Для цитирования:

Андреева Е. В. Поиск оптимальных судоходных маршрутов в акватории арктических морей / Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 191–199. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-191-199.

Введение (Introduction)

1 августа 2022 г. распоряжением Правительства РФ утвержден обновленный план развития Северного морского пути (СМП) до 2035 г. [1], реализация которого направлена на решение стратегической задачи обеспечения круглогодичного судоходства в акватории СМП. В дополнение к плану Правительством РФ утвержден порядок финансирования создания цифровой экосистемы СМП, включающей единую платформу цифровых сервисов, предоставляемых в акватории СМП, бортовых автоматизированных информационно-вычислительных комплексов, комплексов оперативного мониторинга ледовой обстановки и информационного фонда данных о состоянии акватории СМП для обеспечения функционирования цифровых платформ маршрута [2]. Цифровая платформа должна способствовать решению задачи выбора безопасного (оптимального) маршрута для каждого судна в условиях непрерывно меняющейся ледовой и навигационной обстановки.

Круглогодичная навигация в акватории СМП осуществляется с 2006 г. только в юго-западной части Карского моря, отличающегося относительно легкими ледовыми условиями, сравнительно большими глубинами, небольшой протяженностью морских путей, высоким уровнем гидрографической изученности рельефа дна [3], [4], многолетними наблюдениями ледовой обстановки [5], [6] и активно развивающейся инфраструктурой [7]. Проблема круглогодичной навигации здесь решена вводом в эксплуатацию крупнотоннажных судов ледового класса Arc7, использованием ледоколов, проведением дноуглубительных работ в акватории портов и на подходах к ним, а также обоснованными прогнозами гидрометеорологической и ледовой обстановки в акватории [8]. В северо-восточной части Карского моря, а также в акватории моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей в зимне-весенний навигационный период (с середины ноября по декабрь и с января до середины июля) на регулярной основе судоходство не осуществляется. Основными причинами этого являются тяжелые ледовые условия и отсутствие достаточного количества ледоколов и транспортных судов, способных преодолевать льды толщиной более 3 м [9]. Судоходство в этих районах преимущественно осуществляется только в летне-осенний навигационный период (с середины июля до середины ноября).

Судоходство в акватории СМП выполняется по рекомендованным маршрутам, проложенным по участкам с хорошей гидрографической изученностью рельефа дна. Значительное отклонение от линии рекомендованного маршрута может привести в необследованную область с опасными глубинами [10]. Рекомендованные маршруты представляют собой оптимальные судоходные маршруты для судов с заданной осадкой в летне-осенний навигационный период при отсутствии льда, так как на них гарантировано плавание по безопасным глубинам и минимальное время перехода. При наличии льда рекомендованные маршруты остаются оптимальными по критерию безопасных глубин, но по времени перехода и критерию ледопроеходимости к оптимальным маршрутам могут не относиться. Кроме того, льды могут перегораживать линии рекомендованных маршрутов, тем самым делая их непригодными или опасными для плавания.

Существующие методы выбора оптимальных судоходных маршрутов [11], как правило, сводятся к *решению двухкритериальной задачи*, в которой в качестве критериев используются длина маршрута между двумя фиксированными точками и время перехода. Выбор оптимальных маршрутов в акватории СМП в общем случае предполагает решение многокритериальной задачи, в которой учитывается влияние нескольких факторов на безопасность судоходных маршрутов, их протяженность и время перехода. К основным факторам, влияющим на безопасность маршрута, относятся: глубины, толщина льда, стесненность, гидрографическая изученность, к экономическим — длина маршрута и время перехода по маршруту между двумя точками.

На практике используется два основных подхода к решению задачи выбора оптимальных маршрутов: *судоводительский* и *гидрографический*. Первый подход используется при проработке перехода конкретного судна и выборе его пути в реальных навигационных условиях в заданный период времени. Второй подход используется при разработке рекомендаций для плавания судов разных типов, основанной на обработке навигационно-гидрографической информации, данных многолетних наблюдений за изменениями состояния ледового покрова и опыте арктического судоходства.

Целью работы является исследование гидрографического подхода к решению задачи поиска оптимальных маршрутов в акватории СМП.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве основных источников информации для решения задачи поиска оптимальных маршрутов используются следующие документы и материалы:

- морские навигационные карты акватории СМП;
- обязательные постановления капитанов арктических портов;
- схемы гидрографической изученности;
- ледовые карты;
- результаты многолетних наблюдений изменчивости толщины льда по данным полярных станций;
- проектная документация строящихся и эксплуатируемых ледоколов и транспортных судов;
- руководящие документы, устанавливающие критерии допуска судов для плавания в акватории арктических морей.

Каждый маршрут r_i , принадлежащий к множеству маршрутов R , характеризуется длиной $l(r_i)$, минимальной глубиной $Z_{\min}(r_i)$, максимальной толщиной льда $h_{\max}(r_i)$, показателем гидрографической изученности $L(r_i)$ и шириной фарватера $B(r_i)$. Оценка маршрутов по критериям безопасности выполняется для расчетных судов с заданной ледопроходимостью $h_{\text{пр}}$ и осадкой d , осуществляющих самостоятельное плавание (СП) во льдах или плавание под проводкой ледокола (ПЛ). Набор частных критериев навигационной безопасности каждого маршрута включает следующие критерии: по осадке f_1 , по ледовым условиям f_2 , по стесненности f_3 , по гидрографической изученности f_4 , а также расчетное время перехода по маршруту T , характеризующему время перехода по маршруту.

Между двумя точками в акватории может быть проложено множество маршрутов R , среди которых необходимо выделить *оптимальные маршруты*, отвечающие требованиям безопасности и экономичности. Решение задачи осложняется противоречивым влиянием учитываемых факторов на оценку состояния маршрутов, а также зависимостью этого влияния от навигационного периода. Задачи подобного рода решаются методами многокритериальной оценки альтернатив [12], [13], включающими следующие основные этапы:

- этап 1 — выбор критериев и разработка оценочных шкал;
- этап 2 — формирование множества маршрутов (альтернатив);
- этап 3 — вычисление частных показателей безопасности для каждого маршрута;
- этап 4 — отбраковка маршрутов, непригодных для плавания судов в заданный навигационный период;
- этап 5 — формирование множества безопасных маршрутов в заданный навигационный период;

этап 6 — вычисление расчетного времени перехода по каждому безопасному маршруту;
этап 7 — выбор оптимальных маршрутов по критерию безопасности и критерию времени перехода.

Сравнительная оценка состояния маршрутов по частным критериям безопасности выполняется с использованием фазовых диаграмм. Каждый частный критерий f_k ($k = 1, \dots, 4$) определен на интервале $[0; 1]$. Условие $f_k = 0$ соответствует нулевому уровню безопасности маршрута, при котором использование маршрута для судоходства по критерию f_k запрещено. Условие $f_k = 1$ соответствует наивысшему уровню безопасности маршрута по критерию f_k . Для каждого частного критерия f_k вводятся нормированные шкалы $\varphi(f_k) \in [0; 1]$, а также пороговые значения частных критериев f_k^{*min} и f_k^{*max} , используемых для оценки безопасности маршрутов (рис. 1).

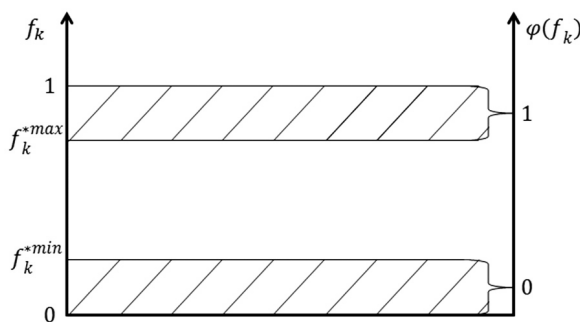


Рис. 1. Нормированная шкала $\varphi(f_k)$

К множеству *опасных маршрутов* по критерию f_k относятся все маршруты, для которых выполняется условие:

$$r_{оп}(f_k) = \{r_{оп} \in R \mid \varphi(f_k) = 0\}. \quad (1)$$

К множеству *безопасных маршрутов* по критерию f_k относятся все маршруты, для которых выполняется условие:

$$r_6(f_k) = \{r_6 \in R \mid 0 < \varphi(f_k) < 1\}. \quad (2)$$

К *абсолютно безопасным* маршрутам по критерию f_k относится часть безопасных маршрутов, для которых выполняется условие:

$$r_{а.б}(f_k) = \{r_{а.б} \in R \mid \varphi(f_k) = 1\}. \quad (3)$$

Поиск оптимальных маршрутов r^* ведется среди безопасных маршрутов по величине показателя безопасности и расчетного времени перехода T по маршруту с использованием метода Парето оптимального поиска альтернатив» [13]. Если маршрут по критерию f_k оценивается как *абсолютно безопасный*, то он не влияет на выбор оптимальных маршрутов. В этом случае единственным критерием оптимизации является *время перехода*.

Задача поиска оптимальных маршрутов по времени перехода T и одному критерию безопасности f_k обобщается в задачу поиска по времени перехода T и четырем критериям безопасности: f_1, f_2, f_3, f_4 . К множеству *опасных маршрутов* по критериям f_1, f_2, f_3 и f_4 относятся все маршруты, для которых выполняется условие:

$$r_{оп}(f_1, f_2, f_3, f_4) = r_{оп} \in R \mid [\varphi(f_1) = 0] \vee [\varphi(f_2) = 0] \vee [\varphi(f_3) = 0] \vee [\varphi(f_4) = 0]. \quad (4)$$

К множеству безопасных маршрутов по критериям f_1, f_2, f_3 и f_4 относятся все маршруты, для которых выполняется следующее условие:

$$r_6(f_1, f_2, f_3, f_4) = r_6 \in R \mid [0 < \varphi(f_1) < 1] \vee [0 < \varphi(f_2) < 1] \vee [0 < \varphi(f_3) < 1] \vee [0 < \varphi(f_4) < 1]. \quad (5)$$

К *абсолютно безопасным* маршрутам по критериям f_1, f_2, f_3 и f_4 относится часть безопасных маршрутов, для которых выполняется условие:

$$r_{a.6}(f_1, f_2, f_3, f_4) = r_{a.6} \in R \mid [\varphi(f_1) = 1] \vee [\varphi(f_2) = 1] \vee [\varphi(f_3) = 1] \vee [\varphi(f_4) = 1]. \quad (6)$$

Поиск оптимальных маршрутов r^* ведется среди безопасных маршрутов по величине каждого из четырех показателей безопасности и расчетного времени перехода T по маршруту с использованием метода Парето оптимального поиска альтернатив». Критерии, по которым маршруты оцениваются как *абсолютно безопасные*, не влияют на выбор оптимальных маршрутов, что позволяет их не использовать.

Результаты (Results)

Проверка метода поиска оптимальных маршрутов выполнена с использованием модели, схема которой приведена на рис. 2.

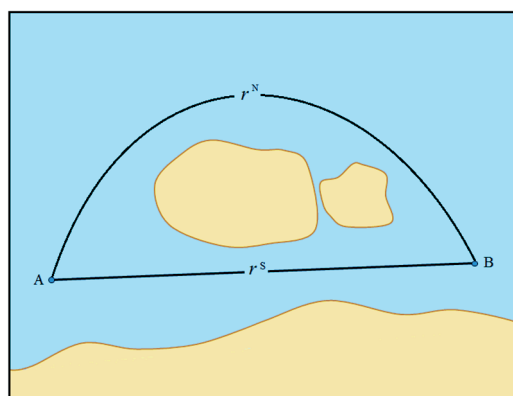


Рис. 2. Маршруты в акватории СМП

Между точками A и B проложено два маршрута: r^N — северный маршрут и r^S — южный маршрут. Маршруты проходят вблизи берегов, обозначенных на схеме коричневым цветом. В табл. 1 приведены характеристики маршрутов, отличающихся длиной и значениями минимальных глубин. По состоянию ледовых условий выделено три периода: лед на маршрутах отсутствует (июль — сентябрь), толщина льда составляет 100 см (декабрь — январь) и толщина льда составляет 200 см.

Таблица 1

Характеристика маршрутов

Маршрут	Характеристика маршрутов				
	Длина, мили	Глубины минимальные, м	Толщина льда, см		
			июль – сентябрь	декабрь – январь	апрель – май
Северный, r^N	860	19,0	0	100	200
Южный, r^S	720	13,0			

Оценивается возможность круглогодичного плавания судов ледовой категории Arc4 и ледовой категории Arc7 при их самостоятельном плавании (СП) по маршрутам и при плавании (Пл.) под проводкой ледоколов Icebreaker8 и Icebreaker9. Характеристики судов и их ледопроеходимости в зависимости от способа плавания приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика судов

Номер судна	Ледовый класс	Осадка, м	Ледопроеходимость, м			
			Летне-осенний период		Зимне-весенний период	
			СП	Пл	СП	Пл
1	Arc4	9,0	0,8	1,0	0,6	0,7
2	Arc7	11,0	1,7	3,2	1,4	2,0
3	Icebreaker8	8,5	Без ограничений	–	3,0	–
4	Icebreaker9	13,0	Без ограничений	–	4,0	–

Допускается, что факторы стесненности и гидрографической изученности рельефа дна при плавании по маршрутам r^N и r^S не представляют опасности. На этом основании $f_3 = 1$ и $f_4 = 1$. Результаты оценки маршрутов по критериям f_1, f_2 и T при отсутствии льда приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Оценка маршрутов по критериям f_1, f_2 и T
при отсутствии льда**

Номер варианта	Номер судна (способ плавания)	Северный маршрут r^N			Южный маршрут r^S		
		$\Phi(f_1)$	$\Phi(f_2)$	T , ч	$\Phi(f_1)$	$\Phi(f_2)$	T , ч
1	1(СП)	0,53	1	57	0,31	1	48
2	2(СП)	0,42	1	57	0,15	1	48
3	3	0,55	1	57	0,35	1	48
4	4	0,32	1	57	0	1	—

При отсутствии льда плавание судов оценивается только по критерию f_1 и времени перехода T судна по маршруту. Южный маршрут для первых трех вариантов плавания оказывается более предпочтительным по времени перехода. Использование четвертого варианта плавания по южному маршруту должно быть запрещено по критерию f_1 . Этот вариант (плавание ледокола Icebreaker9, имеющего осадку 13 м) может быть реализован только по северному маршруту. Северный маршрут для всех четырех вариантов является наиболее предпочтительным по критерию f_1 . Результаты оценки маршрутов по критериям f_1, f_2 и T при толщине льда 100 см приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Оценка маршрутов по критериям f_1, f_2 и T
при толщине льда 100 см**

Номер варианта	Номер судна (способ плавания)	Северный маршрут, r^N			Южный маршрут, r^S		
		$\Phi(f_1)$	$\Phi(f_2)$	T , ч	$\Phi(f_1)$	$\Phi(f_2)$	T , ч
5	1(СП)	0,53	0	—	0,31	0	—
6	2(СП)	0,42	0,28	205	0,15	0,28	180
7	3	0,55	0,67	86	0,35	0,67	72
8	4	0,32	0,77	75	0	0,77	—
9	1(ПЛЗ)	0,53	0	—	0,31	0	—
10	1(ПЛ4)	0,32	0	—	0	0	—
11	2(ПЛЗ)	0,42	0,50	123	0,15	0,50	103
12	2(ПЛ4)	0,32	0,50	123	0	0,50	—

В табл. 4 варианты 9–12 соответствуют вариантам плавания судна 1 или 2 под проводкой ледокола 3 или 4. Наличие льда приводит к увеличению времени перехода по северному и южному маршруту, а также накладывает запрет на возможность использования вариантов плавания 5, 9 и 10 для северного маршрута. Совместное влияние льда и малых глубин накладывает запрет на возможность использования вариантов плавания 5, 8, 9, 10 и 12 для южного маршрута.

Судно № 1 не может использоваться ни на одном из маршрутов при любом варианте плавания. Судно № 2 может использоваться при самостоятельном плавании на обоих маршрутах (вариант 6). При этом южный маршрут является предпочтительным по времени перехода, но более опасным по критерию f_1 . Оптимальным для судна № 2 является его плавание по северному маршруту под проводкой ледокола (вариант 11), на котором обеспечивается преимущество по времени перехода и критерию f_2 . Результаты оценки маршрутов по критериям f_1, f_2 и T при толщине льда 200 см приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Оценка маршрутов по критериям f_1, f_2 и T
при толщине льда 200 см**

Номер варианта	Номер судна (способ плавания)	Северный маршрут, r^N			Южный маршрут, r^S		
		$\varphi (f_1)$	$\varphi (f_2)$	$T, ч$	$\varphi (f_1)$	$\varphi (f_2)$	$T, ч$
13	1(СП)	0,53	0	—	0,31	0	—
	2(СП)	0,42	0	—	0,15	0	—
15	3	0,55	0,33	173	0,35	0,33	144
16	4	0,32	0,53	107	0	0,53	—
17	1(ПЛЗ)	0,53	0	—	0,31	0	—
18	1(ПЛ4)	0,32	0	—	0	0	—
19	2(ПЛЗ)	0,42	0,22	287	0,15	0,22	240
20	2(ПЛ4)	0,32	0,22	287	0	0,22	—

В табл. 5 варианты 17–20 соответствуют вариантам плавания судна 1 или 2 под проводкой ледокола 3 или 4. Судно № 1 не может использоваться ни на одном из маршрутов при любом варианте плавания (варианты 13, 17 и 18). Судно № 2 на северном маршруте может использоваться под проводкой ледокола № 3 (вариант 19) или № 4 (вариант 20), а на южном маршруте оно может использоваться только под проводкой ледокола № 3 (вариант 19). По времени перехода преимущество имеет южный маршрут (вариант 19). Однако по критерию f_1 южный маршрут уступает северному. При прочих равных условиях вариант 19 по сравнению с вариантом 20 имеет преимущество по критерию f_1 .

Обсуждение (Discussions)

Полученные в ходе моделирования результаты хорошо согласуются с данными реального судоходства. Вместе с тем следует отметить, что проверка метода выбора оптимальных маршрутов и вариантов плавания не учитывает всего разнообразия возможных судоходных маршрутов, ледовых условий, типов используемых судов, а также факторов, влияющих на безопасность и эффективность судоходства. В модели использован локальный фрагмент трассы, поэтому полученные оценки и заключения относятся только к нему и не могут без дополнительного обоснования быть распространены на другие участки маршрута, расположенные вне границ этого фрагмента.

Реальное распределение толщины льда в акватории отличается не только по величине, но и по разнообразию. При моделировании использованы максимальные значения толщины припайного льда, полученные на полярных станциях в используемые навигационные периоды. Очевидно, что измеряемая на полярных станциях толщина припайного льда может существенно отличаться от распределения толщины льда по маршрутам движения судов, находящихся на значительном расстоянии от полярных станций, а кроме того, проложенных в зонах распространения плавучих льдов.

Принятое при моделировании допущение о том, что линии маршрутов, соответствующих летне-осеннему и зимне-весеннему периодам навигации совпадают, на практике, как правило, не соблюдается. В зимне-весенний навигационный период маршруты могут отклоняться от летних маршрутов на значительные расстояния, что естественным образом влияет на сравнительную оценку маршрутов по критериям безопасности. Учет влияния отклонений маршрутов на оценку их безопасности требует дополнительного специального исследования. Вместе с тем полученные результаты позволяют оценивать безопасность использования маршрутов различными типами судов как при их самостоятельном плавании, так и под проводкой ледоколов с использованием множества количественных оценок.

Заключение (Conclusion)

Проблема перехода к круглогодичной навигации во всей акватории Северного морского пути включает комплекс взаимосвязанных задач, к которым относятся:

- строительство новых судов и оптимизация структуры арктического флота;
- развитие системы навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения;
- создание единой сети информационно-измерительных комплексов, расположенных на полярных станциях, на судах и космических аппаратах;
- разработка новых методов и моделей.

Настоящая работа посвящена решению части указанных задач. По мере поступления актуальной информации разрабатываемый метод будет совершенствоваться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 1 августа 2022 г. № 2115-р. «Об утверждении плана развития Северного морского пути на период до 2035 г.» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/news/46171/> (дата обращения: 10.01.2023).
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 12.01.2023 № 8 «Об утверждении Правил предоставления субсидии из федерального бюджета на обеспечение создания цифровой экосистемы Северного морского пути» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202301160013> (дата обращения: 20.01.2023).
3. *Шацбергер Э. М.* Тактика плавания во льдах. Ледовые пути Арктики / Э. М. Шацбергер. — СПб.: Артиком, 2012. — 400 с.
4. *Афонин А. Б.* Комплексная оценка безопасности плавания в акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.
5. *Егоров А. Г.* Изменение возрастного состава и толщины зимнего покрова арктических морей России в начале XXI века / А. Г. Егоров // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2020. — Т. 66. — № 2. — С. 124–143. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143.
6. *Смоляницкий В. М.* Сравнительный анализ прямых измерений толщин льда и высот снега, наблюдений Cryosat — 2 и численных оценок системы PIOMAS / В. М. Смоляницкий, А. Б. Тюряков, К. В. Фильчук, И. Е. Фролов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2020. — Т. 66. — № 3. — С. 337–348. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348.
7. *Башмакова Е. П.* Развитие Северного морского пути и инфраструктуры арктической транспортной системы / Е. П. Башмакова, М. В. Ульченко // Региональные проблемы преобразования экономики. — 2019. — № 12 (110). — С. 88–96. DOI: 10.26726/1812-7096-2019-12-88-96.
8. Вячеслав Рукша, Росатом: «На СМП можно переориентировать до 15 % грузопотока из Суэцкого канала» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.atomic-energy.ru/statements/2022/10/13/129239> (дата обращения 25.01.2023).
9. Проблемы Северного морского пути / Отв. ред. А. Г. Гранберг, В. И. Пересыпкин. — М.: Наука, 2006. — 580 с.
10. *Андреева Е. В.* Учет влияния гидрографической изученности на безопасность плавания крупнотоннажных судов в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева, К. Я. Исаулова, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 856–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-856-866.
11. *Акмайкин Д. А.* Эвристический поиск оптимального маршрута судна по северному морскому пути / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, П. А. Салюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-55-62.
12. *Андреева Е. В.* Многокритериальный подход в задаче выбора оптимальных маршрутов в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 399–408. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-399-408.
13. *Ногин В. Д.* Принятие решений в многокритериальной среде / В. Д. Ногин. — М.: Физматлит, 2005. — 176 с.

REFERENCES

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 1 avgusta 2022 g. № 2115-r. «Ob utverzhdenii plana razvitiya Severnogo morskogo puti na period do 2035 g. Web. 10 Jan. 2023 <<http://government.ru/news/46171/>>.
2. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 12.01.2023 № 8 «Ob utverzhdenii Pravil predostavleniya subsidii iz federal'nogo byudzheta na obespechenie sozdaniya tsifro-voi ekosistemy Severnogo morskogo puti». Web. 20 Jan. 2023 <<http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202301160013>>.
3. Shatsberger, E. M. *Taktika plavaniya vo l'dakh. Ledovye puti Arktiki*. SPb.: Artikom, 2012.
4. Afonin, Andrej B. "A comprehensive assessment of the safety of navigation in the water area of the Northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.
5. Egorov, Alexander G. "The Russian arctic seas ice age composition and thickness variation in winter periods at the beginning of the 21st century." *Arctic and Antarctic Research* 66.2 (2020): 124–143.
6. Smolyanitsky, Vasily M., Andrey B. Turyakov, Kirill V. Filchuk, and Ivan E. Frolov. "Comparison of direct measurements of sea ice thickness and snow height, CryoSat-2 observations and PIOMAS numerical estimates." *Problems of the Arctic and Antarctic* 66.3 (2020): 337–348. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348.
7. Bashmakova, Elena Petrovna, and Mikhail Vasilievich Ulchenko. "Development of the Northern Sea Route and infrastructure Arctic transport system." *Regional problems of transforming the economy* 12(110) (2019): 88–96. DOI: 10.26726/1812-7096-2019-12-88-96.
8. Vyacheslav Ruksha, Rosatom: «Na SMP možno pereorientirovat' do 15 % gruzopotoka iz Suetskogo kanala». Web. 25 Jan. 2023 <<https://www.atomic-energy.ru/statements/2022/10/13/129239>>.
9. Granberg, A.G., and V. I. Peresypkin, eds. *Problemy Severnogo morskogo puti*. M.: Nauka, 2006.
10. Andreeva, Ekaterina V., Kristina Y. Esaulova, and Aleksandr L. Tezikov. "Accounting the impact of hydrographic studies on the safety of navigation of large-tonnage vessels in the Northern Sea Route water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 856–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-856-866.
11. Akmaykin, Denis Aleksandrovich, Svetlana Fedorovna Klyueva, and Pavel Anatolievich Salyuk. "Heuristic search for the optimal route ship Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-55-62.
12. Andreeva, Ekaterina V. "Multi-criteria approach to the problem of choosing the optimal routes in the waters of the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 399–408. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-399-408.
13. Nogin, V. D. *Prinyatie reshenii v mnogokriterial'noi srede*. M.: Fizmatlit, 2005.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андреева Екатерина Валерьевна — ассистент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_gm@gumrf.ru
Тезиков Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: altezikov@yandex.ru, TezikovAL@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andreeva, Ekaterina V. — Assistant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_gm@gumrf.ru
Tezikov, Aleksandr L. — Dr. of Technical Sciences,
professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: altezikov@yandex.ru, TezikovAL@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 29 января 2023 г.
Received: January 29, 2023.