

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-399-408

## MULTI-CRITERIA APPROACH TO THE PROBLEM OF CHOOSING THE OPTIMAL ROUTES IN THE WATERS OF THE NORTHERN SEA ROUTE

**E. V. Andreeva**

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

*The process of choosing the optimal routes for large-capacity transport vessels in the water area of the Northern Sea Route is studied in the paper. The topic relevance is related to the requirements for the implementation of the “Comprehensive plan for the development of the Northern Sea Route until 2030” and “Strategy for the development of the Arctic zone of Russia until 2035”. An assessment of the current state of the Arctic transport system and changes that have affected the composition and structure of the transport fleet is given, the issues of the construction of new Arctic ports and cargo terminals are touched upon, and the growth in the sea freight volume is given. The duration of the navigation period is analyzed, and the characteristics of the navigation-hydrographic and hydrometeorological and ice support of navigation are given. The performed analytical review of the known methods for finding the optimal routes of sea vessels has showed that all of them, as a rule, are based on the solution of two-criterion problems and relate mainly to one specific type of vessel, which does not allow using the obtained solution for vessels of different types, differing in draft and ice cross-country ability. To overcome this drawback, a multicriteria approach is proposed that takes into account the length of the route, the transition time, as well as the safety criteria associated with the possible vessel grounding or receiving ice damage. In addition, the method provides taking into account the influence of insufficient hydrographic knowledge of the bottom relief on the accident rate of ships associated with touching dangerous local seabed uplifts that are not indicated on the nautical navigational charts. The formulas for calculating particular indicators of route optimality have been obtained. As an optimal route, it is proposed to use a solution that satisfies the Pareto principle. The method is tested when choosing the optimal routes in the water area of the Northern Sea Route for ships with the ice category Arc7, the results of which confirmed the effectiveness of the method.*

*Keywords: Northern Sea Route, shipping routes, year-round navigation, multi-criteria approach, optimization criteria, ice conditions, depths, tightness, hydrographic knowledge, Pareto principle.*

**For citation:**

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.

**УДК 528.47**

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД В ЗАДАЧЕ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ В АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

**Е. В. Андреева**

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

*В работе исследован процесс выбора оптимальных маршрутов крупнотоннажных транспортных судов в акватории Северного морского пути. Актуальность темы связана с требованиями выполнения «Комплексного плана развития Северного морского пути до 2030 г.» и «Стратегии развития арктической зоны России до 2035 г.». Дана оценка современного состояния Арктической транспортной системы и изменений, отразившихся на составе и структуре транспортного флота, затронуты вопросы строительства новых арктических портов и грузовых терминалов, показан рост объемов морских грузоперевозок. Проанализирована продолжительность навигационного периода, а также дана характеристика навигационно-гидрографического, гидрометеорологического и ледового обеспечения судоходства. Выполненный аналитический обзор известных методов поиска оптимальных маршрутов морских судов показал,*

*что все они, как правило, основаны на решении двухкритериальных задач и относятся преимущественно к одному конкретному типу судов, что не позволяет использовать полученное решение для судов разных типов, отличающихся осадкой и ледовой проходимостью. Для преодоления этого недостатка предложен многокритериальный подход, учитывающий протяженность маршрута, время перехода, а также критерии безопасности, связанные с возможной посадкой судна на мель или получением им ледовых поврежденных. Кроме того, метод предусматривает учет влияния недостаточной гидрографической изученности рельефа дна на аварийность судов, связанную с касанием опасных локальных поднятий дна, не обозначенных на морских навигационных картах. Получены расчетные формулы для вычисления частных показателей оптимальности маршрутов. В качестве оптимального маршрута предложено использовать решение, удовлетворяющее принципу Парето. Методика прошла проверку при выборе оптимальных маршрутов в акватории Северного морского пути для судов с ледовой категорией Arc7, результаты которой подтвердили эффективность метода.*

*Ключевые слова: Северный морской путь, судоходные маршруты, круглогодичная навигация, многокритериальный подход, критерии оптимизации, ледовые условия, глубины, стесненность, гидрографическая изученность, принцип Парето.*

**Для цитирования:**

*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.*

### **Введение (Introduction)**

Северный морской путь (СМП) в навигационном отношении представляет собой одну из самых сложных морских транспортных коммуникаций, отличающихся тяжелыми ледовыми условиями, наличием обширных мелководных участков, недостаточной гидрографической изученностью рельефа дна, а также большой протяженностью судоходных маршрутов. В связи с недостаточной гидрографической изученностью рельефа дна арктических морей в акватории СМП движение судов организовано по рекомендованным маршрутам. В акватории СМП действует разрешительный режим плавания [1].

СМП относится к активно развивающейся морской транспортной системе, в которой отмечаются существенные структурные и количественные изменения. В частности, наблюдается увеличение доли крупнотоннажных транспортных судов, осадка которых достигает 12 м, длина — 300 м, ширина — 50 м, а также судов с категорией ледовых усилений Arc7, расширяется сеть судоходных маршрутов, увеличивается площадь акватории, на которой осуществляется круглогодичная навигация, активно ведется строительство новых портов и реконструкция существующей портовой инфраструктуры, на отдельных участках ведутся дноуглубительные работы, выполняется широкомасштабное плановое обследование рельефа дна на мелководных участках судоходных трасс. В акватории СМП отмечается существенное увеличение интенсивности судоходства. Так, в 2020 г. объем грузоперевозок по акватории увеличился до 33 млн т, что на 4,7 % превышает показатель 2019 г. [2].

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2019 года № 3120-р был утвержден «План развития инфраструктуры СМП на период до 2035 г.» [3], который содержит три этапа [4]. На первом этапе, который завершается в 2024 г., объем морских грузоперевозок должен составить 80 млн т. На втором этапе предусматривается к 2030 г. организация круглогодичных транзитных перевозок по приполюсным трассам. На третьем этапе СМП к 2035 г. должен стать полноценной международной магистралью и национальным транспортным коридором, входом в который послужит Мурманская область, выходом — Петропавловск-Камчатский.

Предполагается построить большое количество принадлежащих государству судов, которые будут обеспечивать круглогодичное судоходство в арктических морях. В 2022–2024 гг. планируется введение в эксплуатацию шестнадцати спасательных и тринадцати гидрографических судов. К концу 2026 г. должно быть завершено строительство и введены в эксплуатацию четыре атомных ледокола проекта 2220 «Арктика». В декабре 2027 г. планируется спуск на воду головного ледокола

проекта «Лидер», способного прокладывать путь во льдах толщиной до 4 м. В 2030–2032 гг. предстоит построить еще два таких атомохода. В настоящее время круглогодичное движение судов осуществляется только в Карском море.

В работах [5] и [6] исследована сезонная изменчивость параметров движения крупнотоннажных судов. При отсутствии льда траектории движения судов, как правило, совпадали с рекомендованными маршрутами, имеющими вид прямых линий. Отклонение судна от рекомендованного маршрута вело к увеличению времени перехода. При увеличении толщины льда на маршруте наблюдалось снижение скорости судна. Отклонение от прямолинейного маршрута в область, свободную ото льда или область с малой толщиной льда, позволяло уменьшить падение скорости, но вело к увеличению длины пути. В результате исследований были зафиксированы значительные боковые отклонения судов от рекомендованных курсов и падение их скорости. Суда, отклоняясь от рекомендованных маршрутов, попадали в некоторых случаях в область с недостаточной гидрографической изученностью, где вынуждены были снижать скорость во избежание негативных последствий возможной аварии при касании грунта на мелководных участках, не обозначенных на морских навигационных картах, а также ледовых повреждений.

Экспериментально было подтверждено, что при наличии льда время перехода по прямой линии между двумя фиксированными точками в ряде случаев не было наименьшим — по мере отклонения от прямой линии время перехода уменьшалось, а затем увеличивалось. В работе ставится вопрос о поиске оптимального маршрута. Под оптимальным понимается такой маршрут, на котором соблюдаются требования навигационной безопасности, а также требования, накладываемые на время перехода судна по маршруту. Поиск оптимального маршрута в условиях малых глубин и труднопреодолимых льдов имеет важное практическое значение.

Решению задачи выбора оптимальных маршрутов судов посвящены многочисленные научные труды и исследования. К ним относятся работы, в которых при выборе оптимального маршрута отдельно учитывались глубины [7]–[9], гидрографическая изученность [10]–[12], гидрометеорологические условия [13], [14], а также протяженность маршрутов [15]. Обзор методов поиска оптимальных маршрутов морских судов показал, что все они, как правило, основаны на решении двухкритериальных задач и относятся преимущественно к одному конкретному типу судов, что не позволяет использовать полученное решение для судов разных типов, отличающихся осадкой и ледовой проходимостью.

*Целью настоящей работы* является разработка метода поиска оптимальных маршрутов, в котором учитываются не только протяженность маршрута и время перехода, но и критерии минимизации аварий, связанных с посадкой судов на мель или получением им ледовых повреждений.

### **Методы и материалы (Methods and Materials)**

При выборе маршрутов судов в акватории СМП учитывается фактор времени перехода, а также фактор безопасности перехода. Фактор безопасности перехода связан с глубинами и гидрографической изученностью рельефа дна на маршруте, а также с ледовыми условиями и стесненностью фарватера. При этом влияние факторов безопасности зависит от ледового класса, осадки, размеров судов и их маневренных характеристик. Таким образом, поиск оптимального маршрута предлагается выполнять на основе решения многокритериальной задачи.

К оптимальным маршрутам в настоящей работе отнесены маршруты, на которых плавание судов, во-первых, будет принципиально возможным, во-вторых, безопасным, а кроме того, будет занимать мало времени. Опыт арктического судоходства показывает, что максимально короткий путь в арктических водах не всегда является самым быстрым. В общем виде время перехода по маршруту определяется выражением

$$T = \frac{l}{V}, \quad (1)$$

где  $T$  — время перехода;

$l$  — протяженность маршрута;

$V$  — скорость судна.

Скорость судна  $V$  представим в виде произведения

$$V = FV_0, \quad (2)$$

где  $F = F(f_1, f_2, f_3)$  — общий фактор навигационной безопасности;

$V_0$  — скорость судна при  $F = 1$ ;

$f_1$  — показатель влияния глубины на потерю скорости;

$f_2$  — показатель влияния льда на потерю скорости;

$f_3$  — показатель влияния стесненности фарватера на потерю скорости.

В формуле (2) условие  $F = 1$  выполняется, когда влияние малых глубин, льда и стесненности на скорость судна отсутствует. Из выражения (2) следует, что при  $F = 1$  скорость судна принимает максимальное значение  $V = V_0 \rightarrow \max$ , а время перехода (1) по маршруту протяженностью  $l$  соответствует минимальному времени перехода  $T \rightarrow \min$ .

Условие  $F = 0$  выполняется также, когда хотя бы один из показателей:  $f_1, f_2, f_3$ , принимает нулевое значение. В этом случае маршрут для плавания судов становится непригодным, судно полностью теряет ход:  $V \rightarrow 0$ , время перехода по маршруту стремится к бесконечности:  $T \rightarrow \infty$ . Таким образом, скорость судна может служить индикатором влияния внешних факторов на его безопасность.

Возможны случаи, когда на самых коротких маршрутах отмечается самая большая потеря скорости, а на более длинных маршрутах потеря скорости может иметь минимальное значение или вообще отсутствовать. При таких условиях переход по более длинному маршруту может оказаться менее опасным, чем по короткому. Из множества маршрутов, характеризующихся одинаковыми значениями показателя  $F \neq 0$ , оптимальным маршрутом считается тот, по которому затрачивается минимальное время. Это условие в общем случае достигается особым соотношением длины маршрута и скорости судна на нем.

Влияние глубины  $Z$  на возможную потерю скорости судна, имеющего осадку  $d$ , в общем виде описывается соотношением

$$f_1 = f\left(\frac{d}{Z}\right), \quad (3)$$

где  $f_1 \in [0; 1]$ .

На больших глубинах, когда  $Z \gg d$ , влияние фактора  $f_1$  на падение скорости судна отсутствует. При таких условиях значение функции (3) должно стремиться к единице. На малых глубинах, когда  $Z \leq d$ , влияние фактора  $f_1$  на падение скорости судна оказывается максимальным. В таких случаях значение функции (3) должно принимать нулевое значение. Из выражения (3) следует, что на одном и том же маршруте влияние глубин на падение скорости зависит от осадки судна  $d$ . Для судов с малой осадкой глубины оказывают меньшее влияние по сравнению с судами, имеющими большую осадку.

Отдельные участки акватории СМП могут характеризоваться недостаточной гидрографической изученностью рельефа дна. Вследствие этого в промежутках между глубинами на навигационных картах могут находиться локальные поднятия дна, которые не были обнаружены в ходе выполнения промерных работ. Для учета гидрографической изученности в работе [13] предложено глубины на маршруте исправлять поправкой  $\Delta_L$ , величина которой зависит от подробности выполненного промера и морфометрических характеристик рельефа дна. С учетом поправки  $\Delta_L$  формула (3) примет вид

$$f_1 = f\left(\frac{d}{Z - \Delta_L}\right). \quad (4)$$

В тех районах, где промерные работы не проводились и сведения о глубинах отсутствуют, принимается, что значение поправки  $\Delta_L$  равно глубине  $Z$ . При таком допущении функция (4) должна иметь такой вид, чтобы показатель  $f_1$  принимает нулевое значение. Последнее означает, что маршрут,

проложенный по необследованной акватории, будет опасным для любых судов. В обследованных районах величина поправки рассчитывается по формуле

$$\Delta_L = kL, \quad (5)$$

где  $k$  — показатель вертикальной расчлененности рельефа дна на уровне 95 % обеспеченности;  
 $L$  — показатель подробности промера.

Поправка  $\Delta_L$  принимает нулевое значение в случае, когда рельеф дна обследован с использованием многолучевых эхолотов или других средств, гарантирующих достоверное обнаружение и обследование всех опасных глубин.

Проведенные исследования [16] показали, что для акватории СМП максимальное значение показателя вертикальной расчлененности на уровне 95 % обеспеченности составляет 0,006. С учетом этого поправка за гидрографическую изученность, соответствующая междугалсовому расстоянию, равному 500 м, составит 1,5 м; поправка, соответствующая междугалсовому расстоянию 2000 м, составит 6 м и т. д.

Влияние льда на возможную потерю скорости судна с ледопроходимостью  $h_{пр}$  в общем виде описывается соотношением

$$f_2 = f \left( \frac{h_{\phi}}{h_{пр}} \right), \quad (6)$$

где  $f_2 \in [0; 1]$ ;

$h_{\phi}$  — фактическая толщина льда на маршруте.

Для тонкого льда, когда выполняется условие  $h_{пр} > h_{\phi}$  (показатель влияния льда  $f_2$  находится в пределах  $0 < f_2 < 1$ ), движение судна по маршруту возможно. Для толстого льда, когда  $h_{пр} \leq h_{\phi}$ ,  $f_2 = 0$ , проход судна невозможен. Суда, работающие в акватории СМП, имеют разные категории ледовых усилений и разную ледовую проходимость. По этой причине показатель  $f_2$  для судов с разной ледовой проходимостью может иметь разные значения:

- если для судов группы  $i$  и  $j$  показатели ледовой проходимости устанавливаются неравенством  $h_{пр*i*} > h_{пр*j*}$ , то соответствующие им показатели влияния льда определяются неравенством  $f_{2*i*} < f_{2*j*}$ ;
- если для судов группы  $i$  и  $j$  показатели ледовой проходимости устанавливаются неравенством  $h_{пр*i*} < h_{пр*j*}$ , то соответствующие им показатели влияния льда определяются неравенством  $f_{2*i*} > f_{2*j*}$ .

Ледовые классы судов и значение их ледопроходимости установлены в Правилах Российского морского регистра судоходства [17]. Влияние фактора стесненности на возможную потерю скорости судна учитывается с использованием показателя  $f_3$ :

$$f_3 = f \left( \frac{B_{\phi}}{B_0} \right), \quad (7)$$

где  $f_3 \in [0; 1]$ ;

$B_{\phi}$  — ширина полосы безопасного движения судна;

$B_0$  — ширина фарватера.

Под районами со стесненными условиями обычно понимают акватории, где судно ограничено в возможности маневрирования из-за близости берегов и других навигационных опасностей. Акватория СМП практически вся может быть отнесена к стесненным водам. Большинство маршрутов СМП проходят по мелководным участкам в окружении многочисленных отмелей и банок [18], а также опасных ледовых образований в виде ледяных полей, торосов, стамух и даже айсбергов [19]. В зависимости от соотношения ширины полосы безопасного движения судна и ширины фарватера могут выполняться условия:

- если  $B_0 > B_{\phi}$ , то показатель влияния стесненности на скорость судна находится в пределах  $0 < f_3 < 1$ , движение судна по маршруту возможно;
- если  $B_0 < B_{\phi}$ , то показатель стесненности маршрута равен нулю, то проход судна невозможен.

С учетом совместного влияния внешних факторов на скорость судна показатель фактора безопасности  $F$  в общем виде может быть представлен в виде произведения трех функций:

$$F = f_1 \left( \frac{d}{Z - \Delta_L} \right) f_2 \left( \frac{h_\Phi}{h_{np}} \right) f_3 \left( \frac{B_\Phi}{B_0} \right), \quad (8)$$

Фактор  $F$  в выражении (8) оказывает влияние на величину фактической скорости судна  $V$  в формуле (2). Если  $F = 1$ , то  $V = V_0$ . В этом случае влияние фактора на скорость отсутствует, что характеризуется совместным выполнением следующих условий:  $B_\Phi = B_0$ ;  $h_\Phi = 0$ ;  $Z \gg d$  и  $L \rightarrow 0$ . Если  $F = 0$ , то  $V = 0$ . В этом случае судно на маршруте прекращает движение в случае влияния хотя бы одного из следующих условий:  $h_\Phi \geq h_{np}$ , или  $d \geq Z - \Delta_L$ , или  $L \rightarrow \infty$ , или  $B_\Phi \rightarrow 0$ .

Функции  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$  в выражении (8) могут быть представлены в явном виде:

$$F = \left( 1 - \frac{d}{Z - \Delta_L} \right) \left( 1 - \frac{h_\Phi}{h_{np}} \right) \left( 1 - \left[ 1 - \frac{B_\Phi}{B_0} \right] \right). \quad (9)$$

Формула (9) может быть использована для вычисления частных показателей влияния глубины, гидрографической изученности дна, льда и стесненности фарватера на скорость судна, а также общего показателя  $F$ .

С учетом выражений (1) и (9) оптимальный маршрут должен удовлетворять условиям:

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{опт}} &= \min \{T\}; \\ F_{\text{опт}} &= \max \{F\}; \\ F &\neq 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

В случае, когда величина параметра  $F$  для разных маршрутов имеет одинаковое значение, за оптимальный маршрут принимается тот, для которого время перехода имеет наименьшее значение, что соответствует принципу Парето [20]. В случае, когда время прохождения для нескольких маршрутов имеет одинаковое наименьшее значение по сравнению с другими маршрутами, за оптимальный принимается маршрут, показатель безопасности которого имеет наибольшее значение.

### Результаты (Results)

Для иллюстрации метода выбора оптимального маршрута рассмотрен пример поиска оптимального маршрута для судов с ледовой категорией Arc7, имеющих осадку 12 м и ледопроездимость 1,7 м. Скорость судна по чистой воде  $V_0$  при отсутствии влияния мелководья принята равной 12 уз. Схема расположения маршрутов показана на рисунке.

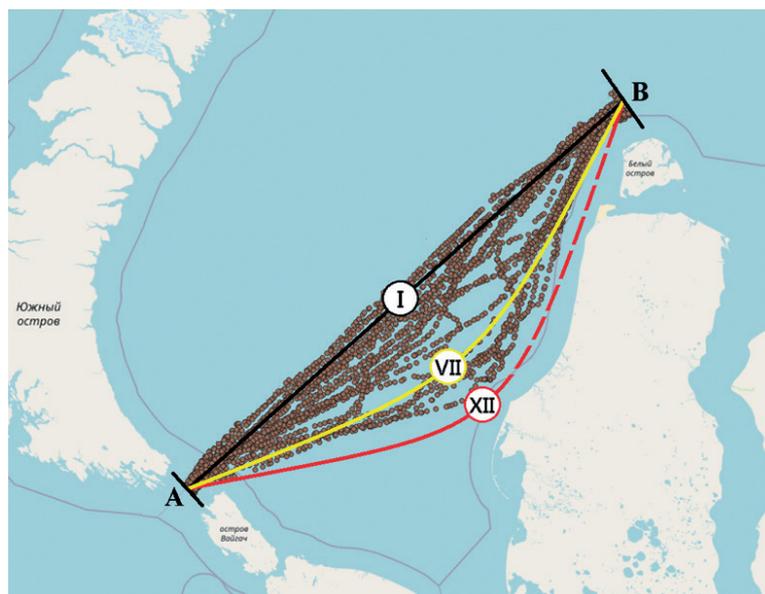


Схема маршрутов:  $AB$  — границы, между которыми расположены маршруты;  $I$  — маршрут, имеющий наименьшую протяженность;  $VII$  — оптимальный маршрут;  $XII$  — маршрут, запрещенный для плавания судов принятого типа

Маршруты расположены между границами *A* и *B*, расстояние между которыми по прямой линии равно 200 миль. Глубины на прямой линии *AB* составили около 50 м. По мере удаления в юго-восточном направлении глубины уменьшались. Подводный рельеф изучен с подробностью 500 м. Толщина льда по прямой линии, соединяющей точки *A* и *B*, составляла 1,3 м. По мере удаления от этой линии в юго-восточном направлении толщина льда уменьшалась до 0,4 м.

Между точками *A* и *B* были выбраны двенадцать маршрутов. Для каждого маршрута определялись параметры, значения которых приведены в таблице.

**Параметры маршрутов**

Номер маршрута <i>i</i>	<i>l</i> , мили	<i>Z</i> , м	<i>h</i> , м	$f_1$	$f_2$	<i>F</i>	<i>V</i>	<i>T</i>
I	200	50	1,30	0,76	0,23	0,17	2,0	100
II	210	50	1,30	0,76	0,23	0,17	2,0	105
III	220	40	1,20	0,70	0,29	0,20	2,4	92
IV	230	30	1,10	0,60	0,35	0,21	2,5	92
V	240	30	1,00	0,60	0,41	0,25	3,0	80
VI	250	30	0,90	0,60	0,47	0,28	3,4	74
VII	260	30	0,80	0,60	0,53	0,32	3,8	68
VIII	270	24	0,60	0,50	0,64	0,32	3,8	71
IX	280	22	0,50	0,45	0,70	0,32	3,8	74
X	290	20	0,40	0,40	0,76	0,30	3,6	80
XI	300	18	0,40	0,33	0,76	0,25	3,0	100
XII	310	10	0,40	0	0,76	0	0	∞

*Примечания:* в первой графе (слева направо) указаны номера маршрутов (1–12); во второй — протяженности маршрута, мили; в третьей — глубина *Z* на маршруте, м; в четвертой — толщина льда *h*, м; в пятой — показатель  $f_1$  влияния глубины на потерю скорости; в шестой — показатель  $f_2$  влияния льда на потерю скорости; в седьмой — показатель навигационной безопасности маршрута *F*; в восьмой — скорость судна на маршруте, уз; в девятой — время перехода по маршруту, ч.

Приведенные в таблице данные позволяют выполнить сравнительную оценку маршрутов. Маршрут I имеет самую небольшую протяженность. На нем отмечается самое значительное влияние льда на снижение скорости. При этом влияние глубин на потерю скорости имеет наименьшее значение. Суммарное воздействие внешних факторов на судно приводит к уменьшению скорости на маршруте до 2,0 уз. Время перехода составляет 100 ч. Маршрут XI имеет протяженность 300 миль, что превышает протяженность маршрута I в три раза. Тем не менее время прохождения обоих маршрутов оказывается одинаковым за счет того, что скорость на маршруте XI, по сравнению с маршрутом I, оказывается на 1 уз выше.

Максимально продолжительное время перехода, равное 105 ч, отмечается на маршруте II, на котором толщина и глубина по своим значениям совпадают с маршрутом I, но протяженность II маршрута на 10 миль превышает протяженность маршрута I. Самая высокая скорость, равная 3,8 уз, отмечается на маршрутах VII, VIII и IX. Наименьшее время перехода 68 ч зафиксировано на маршруте VII. Маршрут XII по ледовым условиям относится к вполне благоприятным, однако по глубинам использоваться для судов с осадкой 12 м не может.

В результате применения многокритериального подхода из двенадцати маршрутов VII маршрут был признан оптимальным по критерию безопасности и времени перехода. На схеме маршрутов он обозначен желтым цветом. Красным цветом обозначен XII маршрут, запрещенный для плавания судов принятого типа.

### Обсуждение результатов (Discussion)

Использование многокритериального подхода в задаче выбора оптимальных маршрутов позволяет получить объективную оценку влияния внешних факторов на навигационную безопасность и время перехода судна по заданному маршруту. При расчетах учитывается влияние каждого внешнего фактора на безопасность и эффективность маршрута. При этом ранжирование маршрутов

по каждому фактору может давать противоречивые результаты и оценки. В таких условиях из множества ранжированных по разным критериям маршрутов выбрать оптимальный представляется неразрешимой задачей, связанной с необходимостью поиска одного оптимального маршрута из множества, удовлетворяющих частным критериям данного показателя. Выход из затруднительной ситуации возможен с использованием принципа Парето, согласно которому многокритериальная задача должна быть сведена к двухкритериальной. С этой целью к частным показателям влияния внешних факторов на выбор маршрутов применяется операция их «свертки». В разрабатываемом методе операция «свертки» проводится в форме перемножения частных показателей. Метод может быть применен к судам, имеющим разную осадку, ледовую проходимость, максимальную скорость по чистой воде, маневренные и другие характеристики. Очевидно, что для судов разных типов положение оптимальных маршрутов будет различаться в зависимости от навигационно-гидрографической, ледовой и гидрометеорологической обстановки.

При использовании многокритериального метода необходимо иметь источники объективной информации о навигационной обстановке района. В качестве основных источников должны быть использованы морские навигационные карты, схемы гидрографической изученности рельефа дна, ледовые карты, карты ледовых прогнозов, а также сведения о параметрах движения судов, полученных с использованием специализированных геоинформационных систем.

### Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предложенный метод позволяет решать задачу поиска оптимальных маршрутов судов разных типов в условиях сложной навигационно-гидрографической и ледовой обстановки. Точность и эффективность решения задачи выбора оптимальных маршрутов зависит от полноты и достоверности исходной информации,
2. Практическое значение разработанного метода состоит в том, что он может использоваться при проектировании сети рекомендованных маршрутов в акватории Северного морского пути, а также при проработке перехода.
3. Дальнейшие исследования будут направлены на уточнение частных критериев оценки безопасности маршрута, в том числе с учетом критерия стесненности акватории.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт Администрации Северного морского пути [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.nsga.ru/> (дата обращения: 15.01.2021).
2. Официальный сайт Министерства транспорта Российской Федерации [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://mintrans.gov.ru/> (дата обращения: 20.01.2021).
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2019 года № 3120-р. «План развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 года» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/docs/38714/> (дата обращения: 20.01.2021).
4. Официальный сайт ИА Neftegaz.RU [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://neftegaz.ru/> (дата обращения: 24.01.2021).
5. Ольховик Е. О. Исследование плотности транспортных потоков 2018 года в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.
6. Ольховик Е. О. Анализ скоростных режимов СПГ-танкеров в акватории Северного морского пути в период зимней навигации 2017–2018 гг. / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 300–308. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308.
7. Сорокин А. И. Гидрографические исследования Мирового океана / А. И. Сорокин. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980. — 287 с.
8. Васьков А. С. Выбор безопасных глубин при плавании судна на мелководье / А. С. Васьков // Морской транспорт. Серия: Безопасность мореплавания. — 1983. — № 2 (152). — С. 18–22.

9. *Неронов Н. Н.* Особенности проводки крупнотоннажных судов по фарватерам Восточной части Финского залива / Н. Н. Неронов // *Навигация и гидрография*. — 2001. — № 12. — С. 107–112.

10. *Решетняк С. В.* Ранжирование трасс Севморпути по критерию гидрографической обеспеченности / С. В. Решетняк, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2008. — № 3 (53). — С. 55–57.

11. *Афонин А. Б.* Концепция развития судоходных трасс акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.

12. *Афонин А. Б.* Исследование влияния подробности гидрографической съемки на оценку проходных глубин / А. Б. Афонин, И. Ю. Королев, А. Л. Тезиков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1007–1016. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1007-1016.

13. *Веремей Е. И.* Алгоритмы оптимизации маршрутов движения с учетом погодных условий / Е. И. Веремей, М. В. Сотникова // *International Journal of Open Information Technologies*. — 2016. — Т. 4. — № 3. — С. 55–61.

14. *Иванов Б. Н.* Решение задачи расчета оптимальных маршрутов судов в рамках программного комплекса «ГИС океан» / Б. Н. Иванов // *Вологдинские чтения*. — 2010. — № 78. — С. 202–206.

15. *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.

16. *Афонин А. Б.* Разработка методов оценки проходных глубин на трассах Северного морского пути в зависимости от подробности съемки рельефа дна / А. Б. Афонин, Е. О. Ольховик, А. Л. Тезиков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 4 (38). — С. 62–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-62-68.

17. *Правила классификации и постройки морских судов. Ч. 1. Классификация.* НД № 2-020101-104. — СПб: Российский морской регистр судоходства, 2018. — 69 с.

18. *Тезиков А. Л.* Гидрографическая изученность акватории Северного морского пути / А. Л. Тезиков, А. Б. Афонин, Е. О. Ольховик // *Транспорт Российской Федерации*. — 2018. — № 2 (75). — С. 19–21.

19. *Миронов Е. У.* Современные методы ледовых исследований и изысканий на шельфе арктических морей / Е. У. Миронов, Ю. П. Гудошников, В. Н. Смирнов // *Проблемы Арктики и Антарктики*. — 2015. — № 1 (103). — С. 57–68.

20. *Ногин В. Д.* Множество и принцип Парето / В. Д. Ногин. — СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2020. — 100 с.

## REFERENCES

1. Federal State Budgetary Institution “The Northern Sea Route Administration”: Official website. Web. 15 Jan. 2021. <<http://www.nsr.ru/>>.
2. Ministry of Transport of the Russian Federation: Official website. Web. 20 Jan. 2021. <<https://mintrans.gov.ru/>>.
3. *Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 21 dekabrya 2019 goda № 3120-r.* «Plan razvitiya infrastruktury Severnogo morskogo puti na period do 2035 goda». Web. 20 Jan. 2021. <<http://government.ru/docs/38714/>>.
4. Information agencies Neftegaz.RU: Official website. Web. 24 Jan. 2021. <<https://neftegaz.ru/>>.
5. Ol'khovik, Evgeniy O. “Research of the density of transports flows on the Northern Sea Route in 2018 year.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.
6. Ol'khovik, Evgeniy O. “Analysis of speed regime LNG-tankers in the Northern sea route in period of winter navigation 2017–18.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 300–308. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308.
7. Sorokin, A. I. *Gidrograficheskie issledovaniya Mirovogo okeana*. L.: Gidrometeoizdat, 1980.
8. Vas'kov, A.S. “Vybor bezopasnykh glubin pri plavanii sudna na melkovod'e.” *Morskoj transport. Seriya: Bezopasnost' moreplavaniya* 2(152) (1983): 18–22.

9. Neronov, N. N. "Specific Features of Pilotage for Large-displacement Vessels along the Fairways in the Eastern Part of the Gulf of Finland." *Navigation and hydrography* 12 (2001): 107–112.
10. Reshetnyak, S. V., A. B. Afonin, and A. L. Tezikov. "Ranging of routes of Northern Sea Route on the criterion of hydrographical support." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(53) (2008): 55–57.
11. Afonin, Andrej B., and Aleksandr L. Tezikov. "The concept of development of shipping routes along the northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.1 (2017): 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.
12. Afonin, Andrej B., Ivan Yu. Korolev, and Aleksandr L. Tezikov. "Research of influence of the detail of hydrographic surveys on assessment of depths through passage." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1007–1016. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1007-1016.
13. Veremei, E. I., and M. V. Sotnikova. "Optimal routing based on weather forecast." *International Journal of Open Information Technologies* 4.3 (2016): 55–61.
14. Ivanov, B. N. "Reshenie zadachi rascheta optimal'nykh marshrutov sudov v ramkakh programmogo kompleksa «GIS okean»." *Vologdinskie chteniya* 78 (2010): 202–206.
15. 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.
16. Afonin, Andrej Borisovich, Evgenij Olegovich Ol'hovik, and Aleksandr L'vovich Tezikov. "Development of the assessment methods of anadromous depths on the Northern sea route depending on the detail of survey of the bottom relief." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 62–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-62-68.
17. *Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, Part I Classification*. ND: 2-020101-138-E. SPb.: Russian Maritime Register of Shipping, 2018.
18. Tezikov, A. L., A. B. Afonin, and Ye. O. Olkhovik. "The state of hydrographic exploration of the Northern Sea Route water area." *Transport of the Russian Federation* 2(75) (2018): 19–21.
19. Mironov, Ye. U., Yu. P. Gudoshnikov, and V. N. Smirnov "Modern methods of ice studies and surveys at the Arctic seas offshore." *Arctic and Antarctic Research* 1(103) (2015): 57–68.
20. Nogin, V. D. *Mnozhestvo i printsip Pareto*. SPb.: Izdatel'sko-poligraficheskaya assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedenii, 2020.

#### 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

#### 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

Статья поступила в редакцию 6 февраля 2021 г.  
Received: February 6, 2021.