

УДК 004.8


DOI: [10.26102/2310-6018/2022.38.3.006](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.38.3.006)

Планирование маршрута перехода судна с учетом параметров ледовой обстановки

В.М. Гриняк^{1,2}, Д.А. Акмайкин³, Ю.С. Иваненко²

¹Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,
Владивосток, Российская Федерация

²Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация

³Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация
victor.grinyak@gmail.com

Резюме. Статья посвящена проблеме безопасного движения судна в ледовых условиях. Рассматривается задача планирования маршрута как оптимизации воздействия льда на судно по мере его движения с учетом вида льда и ледового класса судна. Источником данных о ледовой обстановке по маршруту могут являться специальные информационные сервисы, работающие на основе спутникового мониторинга, сообщений судов и полярных станций и предоставляющие информацию о состоянии ледового покрова в табличном или графическом виде. В статье приводятся модельные представления задачи планирования маршрута, отмечается сложность ее непосредственного решения. Предлагается традиционное для судовождения упрощение задачи – ее сведение к поиску кратчайшего пути на взвешенном графе. Обсуждаются возможные подходы к формированию множества вершин и ребер графа, определению веса ребер графа. Даются рекомендации по уменьшению вычислительной сложности задачи.

Работа сопровождается расчетами маршрутов судов на основе данных о ледовой обстановке в районе Охотского моря. Из приведенных примеров видно, что траектория судна формируется таким образом, чтобы минимизировать движение судна по покрытым льдом участкам. По результатам расчетов маршрутов в различной ледовой обстановке сделан вывод о возможности решения задачи рассматриваемым способом.

Ключевые слова: безопасность судовождения, планирование маршрута, ледовая обстановка, ледовый класс судна, алгоритмы на графах, кратчайший путь.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90018.


Для цитирования: Гриняк В.М., Акмайкин Д.А., Иваненко Ю.С. Планирование маршрута перехода судна с учетом параметров ледовой обстановки *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2022;10(3). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1209>
DOI: 10.26102/2310-6018/2022.38.3.006

Vessel route planning under ice conditions

V.M. Grinyak^{1,2}, D.A. Akmaykin³, Y.S. Ivanenko²

¹Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, Russian Federation

²Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

³Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation
victor.grinyak@gmail.com

Abstract. This paper is devoted to the problem of navigation safety in ice-covered sea areas. The route planning is examined as a means of lessening the impact of ice upon a vessel as it follows its course, taking into consideration the type of ice and the ice class of the vessel. Special information services based on satellite monitoring as well as reports from vessels and polar stations, presenting information on ice cover in tables and diagrams, can be used as the source of data on the ice situation along the route. The current paper proposes a pattern concept of route planning and notes the complexity of its implementation. Simplifying the problem by finding the shortest way of the route in the weighted graph is suggested, which is a conventional strategy in ship navigation. Possible approaches to developing a set of graph nodes and edges as well as weighing the graph edges are discussed. Some recommendations for reducing computational complexity of tasks are given.

The paper is accompanied with calculations of vessel routes using the data on ice situation in the sea of Okhotsk. The given examples show that the ship's track is formed in such a manner that the traffic in the sea areas covered by ice is decreased. Following on from the results of calculating routes under various ice conditions, a conclusion is made about the possibility of solving the problem in this way.

Keywords: navigation safety, route planning, ice conditions, vessel ice class, graph algorithms, shortest path.

Acknowledgements: This research was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 20-38-90018.

For citation: Grinyak V.M, Akmaykin D.A., Ivanenko Y.S. Vessels route planning under ice conditions. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(3). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1209> DOI: 10.26102/2310-6018/2022.38.3.006 (In Russ.).

Введение

Планирование маршрутов судов является актуальной проблемой эксплуатации водного транспорта, постоянно привлекающей внимание исследователей [1-3]. Основной задачей такого планирования является оптимизация маршрутов судов: плавание по кратчайшему из возможных маршрутов, с минимальным расходом топлива, за кратчайшее время и т. п. Выбор маршрута зависит от большого числа факторов: мореходных особенностей судна, параметров груза, направления и характера волнения, ветра, морских течений и иных гидрометеорологических условий, правовых ограничений и т. д. [4, 5]. Особое место среди этих факторов занимает состояние ледовой обстановки вдоль пути следования судна [6, 7].

Морской лед характеризуется множеством свойств, влияющих на способность судов преодолеть его воздействие. Считается, что основными из них являются толщина льда, его сплоченность, торосистость и возраст [8-10]. Прокладка маршрута через льды имеет два связанных аспекта. Во-первых, планируемый маршрут должен быть допустим с точки зрения ледового класса судна, его принципиальной способности безопасного прохождения соответствующих покрытых льдом участков. Во-вторых, маршрут должен быть оптимизирован с точки зрения воздействия льда на судно по мере его движения.

В настоящей работе рассматривается задача планирования маршрута перехода судна с учетом ледовой обстановки по пути следования. Источником информации о ледовой обстановке на маршруте являются специальные сервисы (представленные, например, на портале <https://www.aagi.ru>), предоставляющие данные о состоянии ледяного покрова на основе спутникового мониторинга, сообщений судов и полярных станций. Математическая модель рассматриваемой задачи основана на отраслевых представлениях о возможности плавания судна во льдах, выраженных относительной шкалой. Результаты решения задачи позволяют выбирать маршрут перехода судна, обеспечивающий «легкость» прохода по льдам и минимальную протяженность ледового плавания.

Материалы и методы

Воздействие льда на движущееся судно представляет собой сложный многоаспектный процесс. Несмотря на то, что существуют математические модели, описывающие взаимодействие судна и льда с точки зрения физики этого процесса, их непосредственное использование в обсуждаемом контексте не представляется возможным. В практике судовождения для оценки способности судна двигаться во льдах приняты относительные шкалы. Так, по 10-балльной шкале описывается сплоченность льда, для которой также введены определения разреженного, сплоченного, очень сплоченного и сплошного льда. Для возраста льда определены понятия однолетнего, двухлетнего и многолетнего. Используется шкала видов льда: начальный, нилас, молодой, серый, серо-белый и т. д. Введены определения для ледового класса судов (Icebraker6–Icebraker9, Arc4–Arc9, Ice1–Ice3) [11].

Опасные и безопасные сочетания параметров льда и классов судов устанавливаются на основе судоводительского опыта и закрепляются соответствующими регламентирующими документами. Так, ледокол класса Icebraker6 способен двигаться непрерывным ходом при толщине льда до 1 м и выполнять ледокольные операции во льдах до 1.5 м; ледокол класса Icebreaker8 способен двигаться непрерывным ходом во льдах толщиной до 2 м и выполнять ледокольные операции при толщине льда до 3 м; судно ледового класса Arc7 способно плавать в сплоченном однолетнем льду толщиной до 1.4 м (и т. д., см. Табл. 1).

	Ледовый класс судна	Сплоченность льда	Толщина льда, м
1	Ice1	разреженный	0.4
2	Ice2	разреженный	0.5
3	Ice3	разреженный	0.7
4	Arc4	разреженный	0.8
5	Arc5	разреженный	1.0
6	Arc6	разреженный	1.3
7	Arc7	сплоченный	1.4
8	Arc8	сплоченный	2.1
9	Arc9	сплошной	3.5
10	Icebraker6	сплошной	1.5
11	Icebraker7	сплошной	2.0
12	Icebraker8	сплошной	3.0
13	Icebraker9	сплошной	4.0

Таблица 1 – Ледовые классы судов и их примерные свойства (по данным [11])

Table 1 – Ice classes of vessels and their approximate properties (according to [11])

Введем систему координат x, y , связанную с поверхностью моря. Единицей измерения по осям может являться угловое либо обычное расстояние. В первом случае ось абсцисс x соответствует географической широте, а ось ординат y – географической долготе. Во втором случае оси абсцисс и ординат соответствуют длине дуги большого круга от точки, выбранной в качестве начала координат (в качестве начала координат удобно принять точку, принадлежащую выбранной акватории). Введем функцию $u(x, y)$ – уровень воздействия льда на конкретное судно, в выбранной точке акватории. Пусть судно движется по траектории, заданной некоторой кривой q . В этом случае лед окажет суммарное воздействие на судно, вычисляемое как криволинейный интеграл первого рода

$$u = \int_q u(x, y) dq.$$

Оптимальной траекторией движения судна из множества возможных является такая кривая q^* , которая обеспечивает минимум функционала U , так что

$$q^* = \arg \min_q (U(q)) \quad (1)$$

В ряде исследований [12-14] отмечается, что прямое решение уравнения (1) методами вариационного исчисления и динамического программирования при заданных краевых значениях кривой q и известной функции $u(x, y)$ имеет высокую вычислительную сложность и при практической реализации рассматриваемой задачи не применимо. Поэтому в настоящей работе используем хорошо зарекомендовавший себя в судовождении альтернативный подход – интерпретацию задачи планирования маршрута поиском кратчайшего пути на взвешенном графе [15], [16].

Пусть имеется множество точек p_i с координатами x_i, y_i и заданы начальная и конечная точки маршрута. Для близко расположенных точек вес ребра графа d_{ij} , соединяющего точки p_i и p_j , можно задать следующим образом:

$$d_{ij} = \max(u(x_i, y_i), u(x_j, y_j))r(p_i, p_j),$$

где $r(p_i, p_j)$ – расстояние между точками p_i и p_j , конкретный вид функции r зависит от принятой модели поверхности Земли.

Формирование множества вершин графа

Формирование множества вершин графа возможно самыми различными способами [16, 17]. Это могут быть варианты регулярных сеток вершин или сетка вершин со случайным разбиением. В случае, если доступны ретроспективные данные о движении судов, множество вершин может формироваться путем выбора из имеющихся координат судов на основе некоторой эвристики. Выбор в пользу того или иного варианта определяется характером данных о ледовой обстановке, определяющих функцию $u(x, y)$, их дискретностью и характерным возрастом [18, 19].

В тех случаях, когда источником информации о ледовом покрове является матричное или графическое представление (как, например, на Рис. 1), подходит разбиение на «прямоугольные» участки, соответствующие коэффициентам матрицы или пикселям. Таким образом, множество вершин графа формируется в виде регулярной сетки на тех участках акватории, где движение судна допустимо с точки зрения географии и ледовой обстановки.

Определение множества ребер графа

Самым простым способом формирования множества ребер графа в случае регулярной сетки вершин является их соединение по принципу «каждая с каждой» с исключением ребер, проходящих по участкам, недопустимым для движения. В случае реальных акваторий, где число вершин исчисляется десятками и сотнями тысяч, количество ребер в таком графе будет чрезмерно большим. Для уменьшения числа ребер следует ограничить их максимальную длину, например, соединив вершины с соседними так, как показано на Рисунке 2. Каждая вершина соединяется ребрами с близлежащими, формируя область связности в виде «квадрата» размером 3×3 (Рис. 2, слева), 5×5 (Рис. 2, справа) или из большего числа вершин.

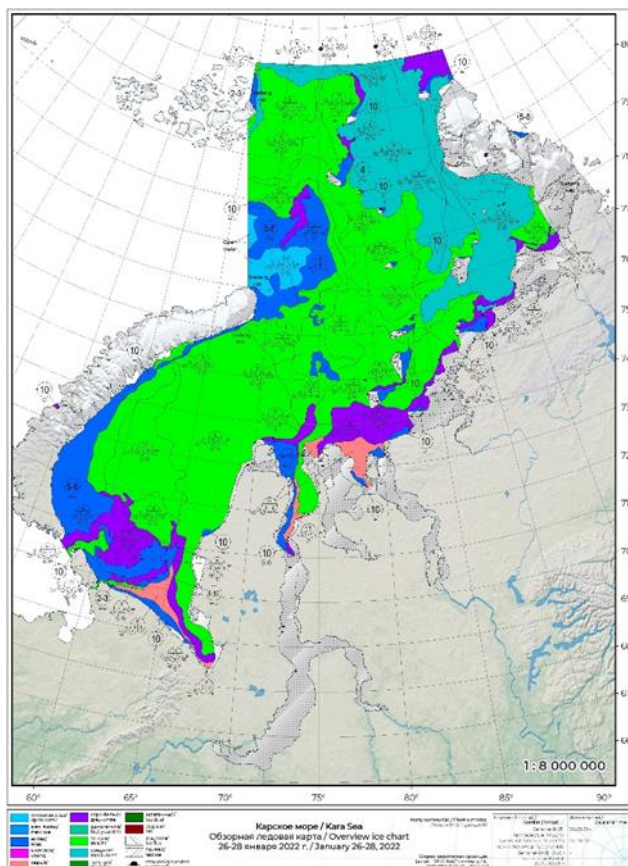


Рисунок 1 – Карта ледовой обстановки в Карском море по данным портала <https://www.aari.ru>
Figure 1 – Map of ice conditions in the Kara Sea according to the portal <https://www.aari.ru>

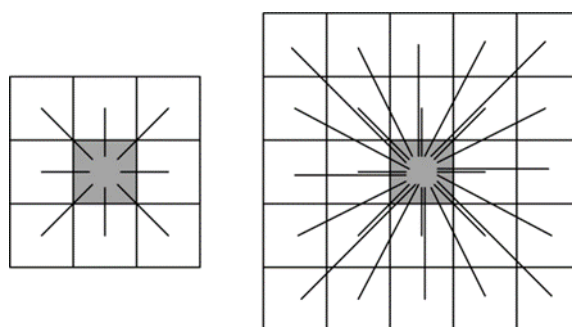


Рисунок 2 – Способ формирования множества ребер графа
Figure 2 – Method for developing a set of graph edges

Недостатком такого графа является дискретность возможных курсов судна и отсутствие ограничений на величину изменения курса судна в точках вершин; потенциально это может порождать неудобные или нереализуемые маршруты.

Определение функции $u(x, y)$ и веса ребер графа

Функция описывает степень воздействия льда на конкретное судно, сложность преодоления судном ледового препятствия при движении. Имея в виду модельную интерпретацию исходной задачи планирования маршрута как поиска кратчайшего пути на графе и дискретность представления данных о ледовой обстановке, функцию $u(x, y)$ удобно задавать в табличном виде относительной безразмерной шкалой. Малые значения функции означают «легкость» плавания, большие – нежелательные (хотя и

допустимые) участки маршрута. В Таблицах 2 и 3 приводится пример значений функции в зависимости от вида льда.

Вид льда	$u(x, y)$
Открытая вода	2
Начальные виды	3
Нилас	5
Серый	8
Молодой	10
Серо-белый	13
Тонкий	15
Однолетний	20
Средний	25
Толстый	30

Таблица 2 – Возможные значения функции $u(x, y)$ для судов «высокого» ледового класса
Table 2 – Possible values of the function $u(x, y)$ for "strong" ice class vessels

Так, в Таблице 2 приведены значения функции $u(x, y)$ для судна, способного плавать во льдах любого типа из приведенных – класса Arc7 и выше. В Таблице 3 – значения функции $u(x, y)$ для судов класса Arc5, плавание которых допустимо лишь в тонких однолетних льдах. В последнем случае значения функции для участков с однолетним, средним и толстым льдом равны бесконечности, соответствующие ребра графа исключаются из возможных при поиске пути.

Вид льда	$u(x, y)$
Открытая вода	1
Начальные виды	3
Нилас	5
Серый	10
Молодой	15
Серо-белый	25
Тонкий	30
Однолетний	∞
Средний	∞
Толстый	∞

Таблица 3 – Возможные значения функции $u(x, y)$ для судов ледового класса Arc5
Table 3 – Possible values of the function $u(x, y)$ for vessels of the ice class Arc5

Основной способ задания значений функции $u(x, y)$ для конкретного судна – экспертный. Возможно также использование обучающей выборки, формируемой на основе ретроспективных данных о движении судна в различной ледовой обстановке. При известных значениях $u(x, y)$ вес ребер графа задается согласно формуле (2). Для практического решения обсуждаемой задачи вид функции u удобно задавать, исходя из модели поверхности Земли в виде шара известного радиуса.

Поиск кратчайшего пути на графе

Для нахождения самого короткого пути на взвешенном графе существует множество хорошо разработанных и изученных методов, наиболее популярные из них – алгоритмы Беллмана-Форда и Дейкстры [20]. В рассматриваемом случае имеет место

разреженный неориентированный граф с неотрицательными весами, поэтому использование алгоритма Дейкстры предпочтительнее. Считается, что его вычислительная сложность пропорциональна квадрату количества вершин в графе. Например, размер той части Рисунка 1, в которой возможно плавание судов, составляет около 2300×1900 пикселей, что дает оценку около 4×10^6 вершин графа или порядка 10^{13} шагов алгоритма. Конечно, такое большое число операций реализуется лишь в отдельных («наихудших») случаях и в целом это делает возможным решение задачи на современных программных и вычислительных средствах общего назначения за приемлемое время.

Результаты

Примеры расчетов были сделаны на данных о ледовой обстановке в районе Охотского моря с января по апрель 2021 года, полученных с портала <https://www.aari.ru>. На Рисунке 3 показаны результаты планирования маршрута перехода судна (жирная красная линия) из пролива Лаперуза в порт Магадан в январе (Рис. 3а), феврале (Рис. 3б), марте (Рис. 3в) и апреле (Рис. 3г). Граф возможных маршрутов строился так, чтобы каждая вершина соединялась с соседними, формируя область связности размером 5×5 вершин (Рис. 2, справа). Воздействие льда на судно задавалось коэффициентами, приведенными в Таблице 2.

Видно, что маршрут судна формируется таким образом, чтобы минимизировать движение судна по участкам, покрытым льдом. Так, при плавании в январе судно будет двигаться во льдах на небольших промежутках на юго-западе и севере (Рис. 3а). При плавании в феврале оно будет огибать ледяные поля на юго-западе и минимизировать пройденное во льдах расстояние в северной части моря (Рис. 3б). Плавание в марте потребует еще большего обхода ледяных полей на юго-востоке, с выходом за пределы Курильской гряды (Рис. 3в). В апреле ледовая обстановка на юге Охотского моря становится благоприятной, однако в северной части маршрут по-прежнему будет формироваться так, чтобы минимизировать движение через лед (Рис. 3г). Конкретная конфигурация маршрута и соотношение участков движения во льдах и по открытой воде зависит от комбинации значений функции $u(x, y)$. Варьируя их, можно добиться различных вариантов маршрута, в том числе отражающих предпочтения и опыт конкретного судоводителя.

Несколько слов о наблюдаемом «ломаном» участке вычисленного маршрута (движение курсом на север по участку открытой воды в средней части моря). Это является проявлением дискретности возможных значений курса судна, обусловленной особенностями построения графа возможных маршрутов. Из рис. 2 видно, что при движении, например, на северо-восток курсовые углы составляют 0° , 45° и 90° для графа с областью связности 3×3 вершины и 22.5° , 45° и 67.5° для графа с областью связности 5×5 вершин.

Если строить граф возможных маршрутов так, чтобы область связности в окрестности каждой вершины формировалась из большого числа соседних вершин (6×6 , 7×7 или больше), этот эффект будет проявляться в меньшей степени и достигнет в итоге курсовых углов, позволяющих двигаться практически по дуге большого круга для участков с открытой водой. Возможно также последующее сглаживание рассчитанного маршрута известными способами [13, 21].

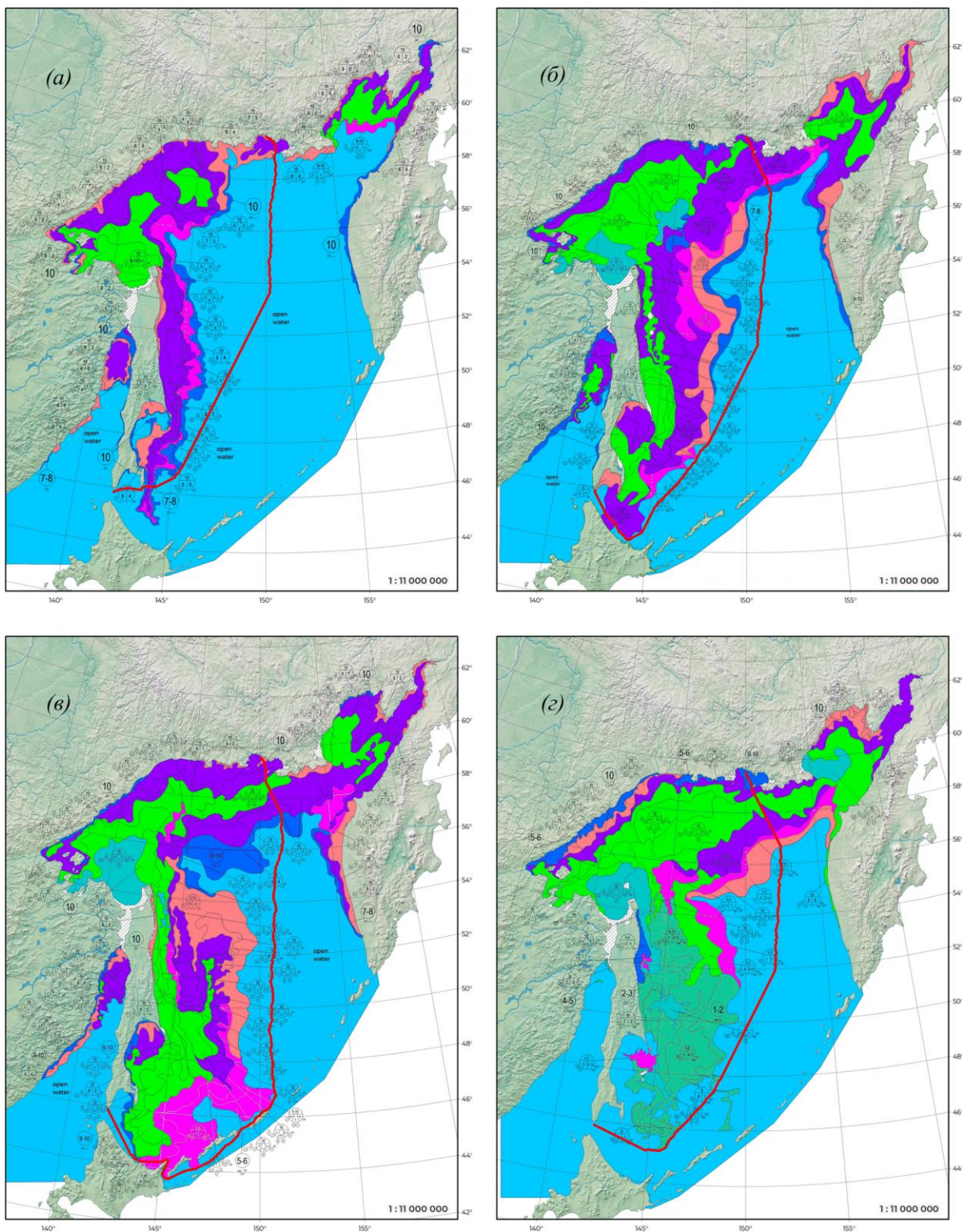


Рисунок 3 – Результаты планирования маршрута «пролив Лаперуза – Магадан» с января по апрель 2021 года

Figure 3 – The results of planning "La Perouse Strait - Magadan" route from January to April 2021

Обсуждение

Выбор маршрута судна из множества возможных путей решения оптимизационной задачи является распространенным подходом, который используется

исследователями и реализуется в практических приложениях. Так, в работе [22] описывается способ оптимизации маршрута судна при его движении в условиях сильных течений и ветров. Авторами показано, что в таких случаях могут использоваться различные критерии оптимизации: по расходу топлива, по времени перехода, по экономическим показателям. В статье [22] приводятся примеры расчета таких оптимальных маршрутов для типичных трансокеанских линий. Рассчитанные таким образом маршруты могут существенно отличаться от привычных, связанных с дугой большого круга. К сожалению, описанный в статье [22] подход не учитывает возможности существования «запрещенных» траекторий судна, проходящих по участкам, движение на которых невозможно или опасно.

Реализация предлагаемого в настоящей работе подхода для протяженных акваторий приводит к построению графа возможных маршрутов судна, состоящего из миллионов вершин и десятков (и даже сотен) миллионов ребер. Использование в этом случае для поиска кратчайшего пути на графе традиционных детерминированных алгоритмов представляет проблему из-за высокой вычислительной сложности задачи. В случае таких больших акваторий целесообразно прибегать к алгоритмам эвристического типа. Например, в работах [13, 21 и 25] используется генетический алгоритм. В работе [12] используется вариационный метод: множество допустимых траекторий формируется так, чтобы они лежали по разные стороны от дуги большого круга, это расстояние является параметром, по которому проводится оптимизация. Известны и другие решения (алгоритм муравьиной колонии [24], алгоритм роя и т. п.). Все эти эвристические методы обладают неустранимым недостатком: они дают решение, не являющееся оптимальным в строгом смысле, однако в рассматриваемой задаче такой эвристический подход оправдан. Дело в том, что ледовая обстановка может изменяться со временем, это изменение может быть существенным даже в масштабе времени движения судна по маршруту. Поэтому даже точные, детерминированные алгоритмы поиска кратчайшего пути в таких условиях будут в итоге приводить лишь к приближенному, «кусочно-оптимальному» решению исходной задачи.

При формировании множества ребер графа следует ограничить размер областей связности в окрестности каждой вершины. Современные программные средства, реализующие нахождение кратчайшего пути на взвешенном графе, обычно хранят множество ребер в виде структуры смежности графа. Практика расчетов показывает, что при области связности размером более 6×6 неоправданно увеличивается время решения задачи и объем используемой памяти. С другой стороны, ограничение области связности окрестностью вершины 3×3 ограничивает выбор курсов судна и не дает «перешагивать» через дефекты рисунка в случае графического представления исходных данных.

Основной проблемой рассмотренного в работе способа планирования маршрутов судов является задание значений функции $u(x, y)$. Как уже было отмечено, для конкретного судна они могут быть заданы экспертными, как, например, сделано в работе [26]. Имея в виду принятое в судоводительской практике представление ледовой обстановки и ледового класса судов относительной шкалой, возможно моделирование функции нечеткой системой. Входными параметрами такой системы являются две лингвистические переменные, задающие ледовую обстановку и ледовый класс судна. Термы этих переменных задаются в соответствии с рекомендациями [11]. Функции принадлежности термов могут задаваться экспертом или (предпочтительнее) с использованием обучающей выборки. Такая выборка строится по ретроспективным данным о движении судов в тех или иных ледовых условиях. В качестве признака, определяющего воздействие льда, можно использовать, например, скорость конкретного судна. Такой подход к моделированию функции $u(x, y)$ перспективен в свете развития

безэкипажного судоходства [27, 28]. Авторы планируют посвятить ему отдельное исследование.

Заключение (Выводы)

1. Планирование маршрута перехода морских судов связано с решением задачи оптимизации. Критериями оптимизации могут быть время, затраченное судном на переход, расход судном топлива, безопасность перехода в тех или иных погодных условиях, экономические показатели перехода и т. п. В настоящей работе рассматривается задача планирования маршрута судна с учетом ледовой обстановки по пути его следования. Предложен критерий оптимизации, связанный со степенью воздействия ледового покрова на конкретное судно и минимизацией расстояния, пройденного судном во льдах.

2. Планирование маршрутов судов путем непосредственного решения задачи оптимизации затруднено, так как приводит к алгоритмам с высокой вычислительной сложностью требующих специализированных программных и вычислительных средств (и не всегда успешно реализуемых даже в этом случае). Хорошо зарекомендовавшим себя упрощением задачи планирования маршрутов для практических приложений является ее модельная интерпретация поиском кратчайшего пути на взвешенном графе. В работе предлагается способ построения такого графа на основе данных о ледовой обстановке, представленных в виде, характерном для современных информационных сервисов (например, <https://www.aagi.ru>) и отраслевых представлений о взаимодействии судна и льда.

3. В работе представлен пример расчетов возможного маршрута судна для ледовой обстановки в акватории Охотского моря. Результаты расчетов подтвердили конструктивность предложенного подхода и могут служить базой для поддержки принятия решений судоводителями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tam Ch. K., Bucknall R., Greig A. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters. *Journal of Navigation*. 2009;62(3):455–476.
2. Першина Л.А., Астреина Л.Б. Выбор маршрута судна на основе погодных условий. *Эксплуатация морского транспорта*. 2019;(2):30–38.
3. Веремей Е.И., Сотникова М.В. Алгоритмы оптимизации маршрутов движения с учетом погодных условий. *International Journal of Open Information Technologies*. 2016;4(3):55–61.
4. Акмайкин Д. А. Хоменко Д.Б., Ключева С.Ф. Обзор функциональных возможностей и перспективы современных автоматизированных систем планирования маршрута судна. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2017;9(2):237–251.
5. Акмайкин Д.А., Букин О.А., Гриняк В.М., Москаленко М.А. Планирование маршрута перехода судна с учётом опасности морского волнения. *Морские интеллектуальные технологии*. 2018;4–5(42):148–152.
6. Вареничев А.А., Громова М.П., Дугин Г.С. Лидирующая роль северного морского пути в освоении перевозок сжиженного природного газа. *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. 2019;(7):65–70.
7. Соболевская Е.Ю., Глушков С.В., Левченко Н.Г. Архитектура интеллектуальной системы организации арктических морских грузоперевозок. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2017;4(19):27.

8. Соболевская Е.Ю., Глушков С.В., Левченко Н.Г. Разработка информационной интеллектуальной системы для организации и управления морскими грузоперевозками в арктических условиях – настройка нечёткого вывода типа Мамдани. *Эксплуатация морского транспорта*. 2019;2(91):68–73.
9. Андреева Е.В. Многокритериальный подход в задаче выбора оптимальных маршрутов в акватории Северного морского пути. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2021;13(3):399–408.
10. Алёшин А.А., Кубрин С.С. Функциональная схема оперативного расчета оптимального маршрута судна в ледовых условиях. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2021;13(2):222–231.
11. Правила классификации и постройки морских судов. Часть 1. Классификация. *Российский морской регистр судоходства. НД № 2-020101-138: СПб*. 2021.
12. Сотникова М.В. Алгоритмы формирования маршрутов движения судов с учетом прогноза погодных условий. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2009;(2):181–196.
13. Wang H.B., Li X.B., Li P.F., Veremey E.I., Sotnikova M.V. Application of real-coded genetic algorithm in ship weather routing. *Journal of Navigation*. 2018;71(4):989–1010.
14. Нуриев Р.А., Ершов А.А. Процедура выбора оптимального пути океанского перехода при штормовом плавании. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2021;13(5):625–635.
15. Гриняк В.М., Акмайкин Д.А., Люлько В.И. Оптимизация маршрута перехода судна с учетом параметров волнения. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2018;6(4):469–483.
16. Гриняк В.М., Шуленина А.В., Прудникова Л.И., Девятисильный А.С. Планирование маршрутов судов через акватории с интенсивным движением. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(2):31–32.
17. Gongxing W., Incecik A., Tezdogan T., Momchil T., Ling Chao W. Long-voyage route planning method based on multi-scale visibility graph for autonomous ships. *Ocean Engineering*. 2021;219:108242.
18. Гриняк В.М., Акмайкин Д.А., Девятисильный А.С. Оценка перспектив использования данных метеоспутников для планирования маршрута судна в арктических водах. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2019;11(2):209–221.
19. Гриняк В.М., Акмайкин Д.А., Иваненко Ю.С. Исследование реализуемости планирования оптимального маршрута судна с учетом спутниковых метеоданных. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2017;2(17):15.
20. Касьянов В.Н., Евстигнеев В.А. *Графы в программировании: визуализация и применение*. СПб.: БХВ-Петербург; 2003.
21. Kuhlemann S., Tierney K. A genetic algorithm for finding realistic sea routes considering the weather. *Journal of Heuristics*. 2020;26:801–825.
22. Lin Y.-H., Fang M.-C., Yeung R.W. The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements. *Applied Ocean Research*. 2013;43:184–194.
23. Lu R., Turan O., Boulougouris E., Banks C., Incecik A. A semi-empirical ship operational performance prediction model for voyage optimization towards energy efficient shipping. *Ocean Engineering*. 2015;(110):18–28.

24. Lazarowska A. Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony optimization. *Journal of Navigation*. 2015;68(2):291–307.
25. Федоренко К.В., Оловянников А.Л. Исследование основных параметров генетического алгоритма применительно к задаче поиска оптимального маршрута. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2017;9(4):714–723.
26. Глушков С.В., Соболевская Е.Ю., Левченко Н.Г. Формирование обучающей выборки для информационной интеллектуальной системы организации и управления арктическими морскими грузоперевозками. *Морские интеллектуальные технологии*. 2020;1–2(47):230–235.
27. Титов А.В., Баракат Л., Чанчиков В.А., Тактаров Г.А., Ковалев О.П. Системы управления безэкипажными судами. *Морские интеллектуальные технологии*. 2019;1–4(43):109–120.
28. Каретников В.В., Козик С.В., Буцанец А.А. К вопросу оценки рисков использования безэкипажных средств водного транспорта на участке акватории. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2019;11(6):987–1002.

REFERENCES

1. Tam Ch. K., Bucknall R., Greig A. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters. *Journal of Navigation*. 2009;62(3):455–476.
2. Pershina L.A., Astreina L. S. Ship routing based on weather conditions. *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. 2019;2(91):30–38. (In Russ.)
3. Veremei E.I., Sotnikova M. V. Optimal routing based on weather forecast. *International Journal of Open Information Technologies*. 2016;4(3):55–61. (In Russ.)
4. Akmaykin D.A., Khomenko D.B., Klueva S.F. Overview Features and Perspectives of Modern Automated Ship Route Planning Systems. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 2017;9(2):237–251. (In Russ.)
5. Akmaykin D.A., Bukin O. A., Grinyak V. M., Moskalenko M. A. Ships Route Planing with the Account of Dangerous Sea Waves. *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii = Marine Intelligent Technologies*. 2018;4–5(42):148–152. (In Russ.)
6. Varenichev A.A., Gromova M.P., Dugin G.S. The Leading Role of Northern Sea Way in the Development Liquefied Natural Gas Transportation. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*. 2019;(7):65–70. (In Russ.)
7. Sobolevskaya E.Y., Glushkov S.V., Levchenko N.G. Architecture of Intelligent System of Organization of Arctic Maritime Cargo Transportation. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = Modelling, optimization and information technologies*. 2017;4(19):27. (In Russ.)
8. Sobolevskaya E.Y., Glushkov S.V., Levchenko N.G. Development of Information Intelligent System for the Organization and Management of Sea Cargo Transportation in Arctic Conditions – Setting of Mamdani Fuzzy Logic System. *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. 2019;2(91):68–73. (In Russ.)
9. Andreeva E.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*. 2021;13(3):399–408. (In Russ.)
10. Aleshin A.A., Kubrin S.S. Functional Scheme of Operative Route Optimization During Ice Navigation. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2021;13(2):222–231. (In Russ.)

11. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Chast 1. Klassifikatsiya. No 2-020101-138. Rossiyskiy morskoy registr sudohodstva. 2021. (In Russ.)
12. Sotnikova M.V. Algorithms of Marine Ships Routing Taking into Account Weather Forecast. *Vestnik Sankt Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya*. 2009;(2):181–196. (In Russ.)
13. Wang H.B., Li X.B., Li P.F., Veremey E.I., Sotnikova M.V. Application of real-coded genetic algorithm in ship weather routing. *Journal of Navigation*. 2018;71(4):989–1010.
14. Nuriev R.A., Ershov A.A. Procedure for Choosing the Optimal Ocean Route When Gale. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S O. Makarova*. 2021;13(5):625–635. (In Russ.)
15. Grinyak V.M., Akmaykin D.A., Lulko V.I. Ships Route Planning with Respect of Sea Wave Properties. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = Modelling, Optimization and Information Technologies*. 2018;6(4):469–483. (In Russ.)
16. Grinyak V.M., Shulenina A.V., Prudnikova L.I., Devyatisilnyi A.S. Ships Route Planning on Heavy-Traffic Marine Area. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = Modelling, Optimization and Information Technologies*. 2021;9(2):31–32. (In Russ.)
17. Gongxing W., Incecik A., Tezdogan T., Momchil T., Ling Chao W. Long-voyage route planning method based on multi-scale visibility graph for autonomous ships. *Ocean Engineering*. 2021;219:108242.
18. Grinyak V.M., Akmaykin D.A., Devyatisilnyi A.S. Assessment of the Prospects for Using Meteorological Satellite Data for Planning a Vessel Route in the Arctic Waters. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2019;11(2):209–221. (In Russ.)
19. Grinyak V.M., Akmaykin D.A., Ivanenko Yu.S. Feasibility Study for Ship Trajectory Planning Problem Using Marine Weather Data from Satellites. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = Modelling, Optimization and Information Technologies*. 2017;2(17):15. (In Russ.)
20. Kasianov V.N., Evstigneev V.A. *Grafy v programmirovanii: vizualizatsiya i primeneniye*. Sankt Petersburg: BHV-Peterburg; 2003. (In Russ.)
21. Kuhlemann S., Tierney K. A genetic algorithm for finding realistic sea routes considering the weather. *Journal of Heuristics*. 2020;26:801–825.
22. Lin Y.-H., Fang M.-C., Yeung R.W. The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements. *Applied Ocean Research*. 2013;43:184–194.
23. Lu R., Turan O., Boulougouris E., Banks C., Incecik A. A semi-empirical ship operational performance prediction model for voyage optimization towards energy efficient shipping. *Ocean Engineering*. 2015;(110):18–28.
24. Lazarowska A. Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony optimization. *Journal of Navigation*. 2015;68(2):291–307.
25. Fedorenko K.V., Olovyannikov A.L. Research of the Main Parameters of the Genetic Algorithm for the Problem of Searching the Optimal Route. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2017;9(4):714–723. (In Russ.)
26. Glushkov S.V., Sobolevskaya E.Y., Levchenko N.G. Formation of training sample for information intelligent system of organization and management of arctic sea cargo transportation. *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii = Marine Intelligent Technologies*. 2020;1–2(47):230–235. (In Russ.)

27. Titov A.V., Barakat L., Chanchikov V.A., Taktarov G.A., Kovalev O.P. Control systems of unmanned vessels. *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii = Marine Intelligent Technologies*. 2019;1–4(43):109–120. (In Russ.)
28. Karetnikov V.V., Kozik S.V., Butsanets A.A. Risks assessment of applying unmanned means of water transport in the water area. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2019;11(6):987–1002. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Гриняк Виктор Михайлович, д-р. техн. наук, доцент, кафедра Информационных технологий и систем, Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Владивосток, Российская Федерация.

e-mail: victor.grinyak@gmail.com

ORCID: [0000-0003-0549-230X](https://orcid.org/0000-0003-0549-230X)

Victor M. Grinyak, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Information Technologies Department, Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, Russian Federation.

Иваненко Юрий Сергеевич, ассистент, департамент Программной инженерии и искусственного интеллекта, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация.

e-mail: yurown92@yahoo.com

Yury S. Ivanenko, Assistant Lecturer, Software Engineering and Artificial Intelligence Department, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation.

Акмайкин Денис Александрович, кандидат технических наук, начальник факультета, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация.

e-mail: akmaykin@gmail.com

Denis A. Akmaykin, Candidate of Technical Sciences, Head of Department, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 28.06.2022; одобрена после рецензирования 15.07.2022; принята к публикации 29.07.2022.

The article was submitted 28.06.2022; approved after reviewing 15.07.2022; accepted for publication 29.07.2022.