

GENETIC ALGORITHM-BASED LINEAR ROUTES OPTIMIZATION MODEL**A. V. Galin, A. S. Malykhin**Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The issue of constructing a theoretical model for optimizing the routes of liner container ships taking into account the distribution of goods between the hinterlands of ports is considered in the paper. The description of the experimental part of the model for container lines taking into account land transportation in the hinterlands of ports is given. It is indicated that in order to support and substantiate decisions taken at the stage of planning routes for the movement of ships of the shipping line, it is necessary to use optimization tools. It is emphasized that the task of optimizing the routes of a linear shipping company is reduced to the need to find such a sequence of bypassing seaports by a ship from a given set, at which the extreme value of the optimality criterion will be achieved. In this form, the optimization problem can be simplified to the classical traveling salesman problem. It is noted that the sources of origin and extinction of cargo flows are located in the hinterlands of ports. It is indicated that the choice of the criterion for optimizing the route of the vessel affects the nature of the problem being solved. The criterion of the optimality of the problem being solved within the framework of the model can be set the freight turnover or the time of the voyage. A theoretical description of the model, formula and scheme on which the model is based, is provided in the paper. A new approach to the problem of liner ships routing on the basis of a liner route optimization model when distributing cargo between port hinterlands is considered. It is indicated that the new method is created by combining the method of genetic chimeras and the method of ordered crossover. The method has a number of advantages over current methods, since in the process of optimizing the routes of a liner shipping company, the distribution of goods between the hinterlands of ports is taken into account.

Keywords: containers, genetic algorithm, optimization.

For citation:

Galin, Aleksandr V., and Aleksandr S. Malykhin. "Genetic algorithm-based linear routes optimization model." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 530–538. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-530-538.

**МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ЛИНЕЙНЫХ МАРШРУТОВ
НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА****А. В. Галин, А. С. Малыхин**ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрен вопрос построения теоретической модели оптимизации маршрутов линейных контейнерных судов с учетом распределения грузов между хинтерлендами портов. Приведено описание экспериментальной части модели для контейнерных линий с учетом наземных перевозок в хинтерлендах портов. Подчеркивается, что для поддержания и обоснования решений, принимаемых на этапе планирования маршрутов перемещения судов судоходной линии, необходимо использование инструментов оптимизации. Отмечается, что задача оптимизации маршрутов линейной судоходной компании сводится к необходимости нахождения такой последовательности обхода судном морских портов из заданного множества, при которой будет достигнуто экстремальное значение критерия оптимальности. В таком виде данная задача может быть упрощена до классической задачи коммивояжера. Подчеркивается, что источники зарождения и угасания грузопотоков находятся в хинтерлендах портов. Указано, что выбор критерия оптимизации маршрута судна оказывает влияние на характер решаемой задачи, критерием оптимальности которой в рамках модели может быть установлен грузооборот или время рейса. В статье приводится теоретическое описание модели, а также формулы и схемы, на которых базируется ее работа. Рассмотрен новый подход к проблеме маршрутизации линейных судов на основе модели оптимизации маршрутов линейных судов при распределении грузов между хинтерлендами портов. Указывается, что новый метод создан путем совмещения метода генетических химер и метода упорядоченного кроссовера. Рассматриваемый

метод имеет ряд преимуществ над актуальными методами, так как в процессе оптимизации маршрутов линейной судоходной компании учитывается распределение грузов между хинтерлендами портов.

Keywords: контейнеры, генетический алгоритм, оптимизация.

Для цитирования:

Галин А. В. Модель оптимизации линейных маршрутов на основе генетического алгоритма / А. В. Галин, А. С. Малыхин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 530–538. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-530-538.

Введение (Introduction)

Морская контейнерная перевозка грузов, с точки зрения судовладельца, представляет собой последовательность судозаходов в морские порты для погрузки и разгрузки контейнерных грузов [1]. Порядок обхода морских портов можно представить в виде нескольких наиболее распространенных типовых схем:

- маятниковой схемы;
- схемы с портом-хабом;
- круговой схемы (на основе круговых рейсов рейсов судна).

Следует отметить, что любая схема, выбранная судовладельцем (оператором судоходной линии), со временем оптимизируется эмпирическим путем: обслуживание одних грузопотоков оказывается выгодным, других — убыточным. Однако эмпирический способ оптимизации является продолжительным по времени, и кроме того, финансово затратным. При этом для поддержания и обоснования решений, принимаемых на этапе планирования маршрутов перемещения судов судоходной линии, необходимо использование *инструментов оптимизации*.

Рейсы судоходной линии базируются на множестве морских портов рассматриваемого региона, в котором имеются грузопотоки, выраженные в виде потребности перемещения груза из одного пункта в другой. Морская перевозка груза при таком перемещении обычно является промежуточным звеном, поэтому некорректно рассматривать ее в отрыве от фактического источника и «терминатора» (пункта назначения) грузопотока. В данном случае источником грузопотока является географический населенный пункт, в котором размещается предприятие, осуществляющее на постоянной основе поставки некоторого груза. Для совершения поставок предприятию необходим входящий поток контейнеров, перегрузочные мощности, обеспечивающие загрузку контейнеров и возможность совершать отправку контейнеров со своей территории [2]. Альтернативным вариантом может являться наземный грузовой терминал, консолидирующий районные грузопотоки, который обеспечивает необходимые мощности и выполняет отправки контейнеризированного груза.

При движении судоходной линии по круговой схеме задача планирования рейсов может быть сформулирована следующим образом: *необходимо найти такую последовательность обхода судном морских портов из заданного множества, при которой будет достигнуто экстремальное значение критерия оптимальности* [3]. При этом достаточно и необходимо, чтобы судно зашло в каждый морской порт ровно один раз и вернулось в начальный порт маршрута. В данной формулировке задача планирования рейсов судоходной линии может быть редуцирована до классической задачи коммивояжера (англ. — Travelling Salesman Problem (TSP)) [4], [5].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Разница между отдельным предприятием, осуществляющим поставки груза, и наземным «сухим» контейнерным терминалом с точки зрения разрабатываемой модели отсутствует. «Терминатором» грузопотока (точкой его поглощения) является конечный населенный пункт транспортировки груза, иными словами, пункт, в котором размещается потребитель продукции, производимой источниками грузопотоков [6]. При этом зарождающиеся и поглощаемые грузопотоки не равны, так как грузопоток, зарождающийся в источнике, может иметь несколько составных частей, каждая из которых предназначена для определенного потребителя. Исходящий грузопоток источника разделяется в морском порту, перемещаясь до соответствующих морских портов, связанных наземной

транспортной сетью с потребителями грузопотока источника (рис. 1). Из примера, приведенного на рисунке, видно, что исходящий грузопоток источника (производителя) Q всегда равен сумме грузопотоков, достигающих потребителей его продукции:

$$Q = \sum_{i=1}^z q_i, \quad (1)$$

где i — порядковый номер потребителя продукции производителя.

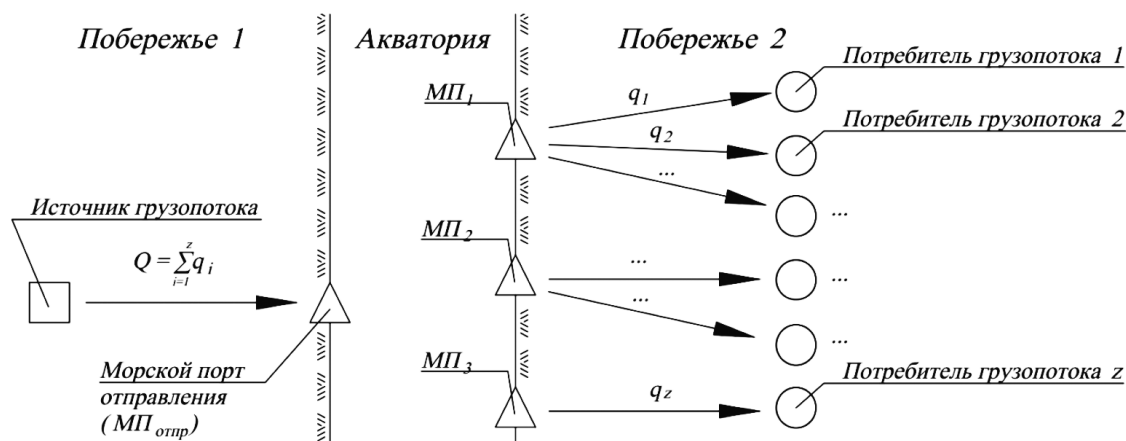


Рис. 1. Пример разделения грузопотоков между потребителями

При этом обычно потребителей несколько, поэтому $q_i \neq Q$.

Источники зарождения и поглощения грузопотоков в модели располагаются в хинтерлендах морских портов. Сами морские порты не могут быть источниками зарождения и поглощения контейнерных грузопотоков, они выполняют роль пункта консолидации и дистрибуции груза.

Выбор критерия оптимизации маршрута судна оказывает влияние на характер решаемой задачи. При выборе времени перехода t_{ij} между портами i и j в качестве критерия оптимальности маршрута направление перехода не имеет значения. При выборе обслуживаемого грузооборота Q_{ij} в качестве критерия оптимальности направление перехода судна может играть существенную роль:

$$t_{ij} = t_{ji};$$

$$Q_{ij} \neq Q_{ji}. \quad (2)$$

Пример такого графа приведен на рис. 2. В обоих случаях построенный граф переходов судна между морскими портами является связным, поскольку из любой вершины (морского порта) можно попасть в любую другую вершину [7]. На рис. 2, а построен неориентированный граф на основе четырех морских портов. При оптимизации маршрута на основе такого графа отсутствует разница между переходом, например, из «Порта 1» в «Порт 2» и наоборот. На рис. 2, б построен ориентированный граф на основе тех же четырех портов. В этом случае между круговым рейсом: «Порт 1» → «Порт 2» → «Порт 3» → «Порт 4» → «Порт 1» и круговым рейсом: «Порт 1» → «Порт 4» → «Порт 3» → «Порт 2» → «Порт 1» может быть существенная разница в объеме обслуживаемого грузооборота.

Несмотря на данное различие с точки зрения вычислительной сложности, эти два варианта задачи являются идентичными. Для решения задачи оптимизации кругового рейса судна на основе критерия времени кругового рейса составляется матрица расстояний между морскими портами. В простейшем случае постановки задачи расстояния могут быть определены как евклидовы метрики между двумя точками с координатами X и Y в двумерном пространстве. Однако в реальности такой метод не является достаточно точным из-за кривизны геоида и особенностей судоходных путей, поэтому рекомендуется обращаться к таблицам расстояний между морскими портами для задания

дистанций перехода судов. Примером существенного различия между матрицей расстояний, рассчитанной на основе евклидовых метрик, и фактическими расстояниями между портами может служить расположение портов Европы (рис. 3).

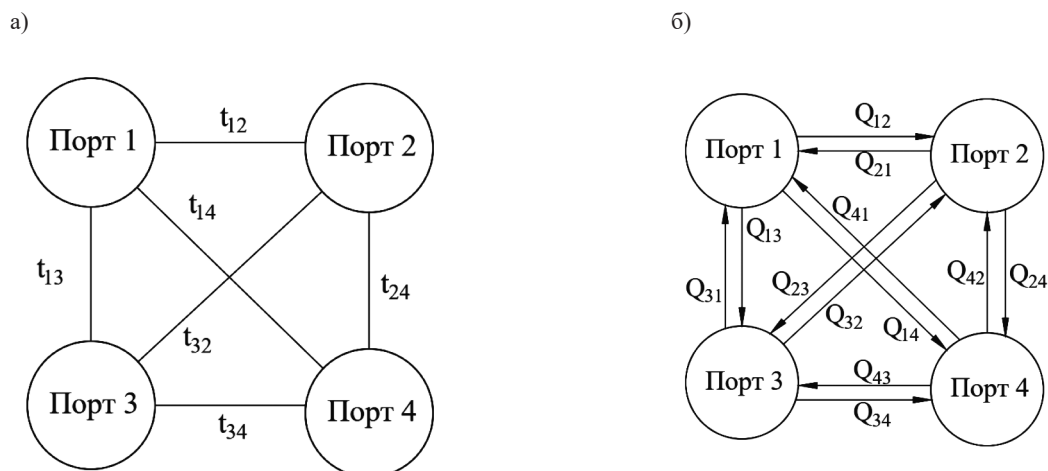


Рис. 2. Вид графа переходов судна между морскими портами в зависимости от критерия оптимальности маршрута:

a — критерий оптимальности — время t_{ij} ;
б — критерий оптимальности — грузооборот Q_{ij}

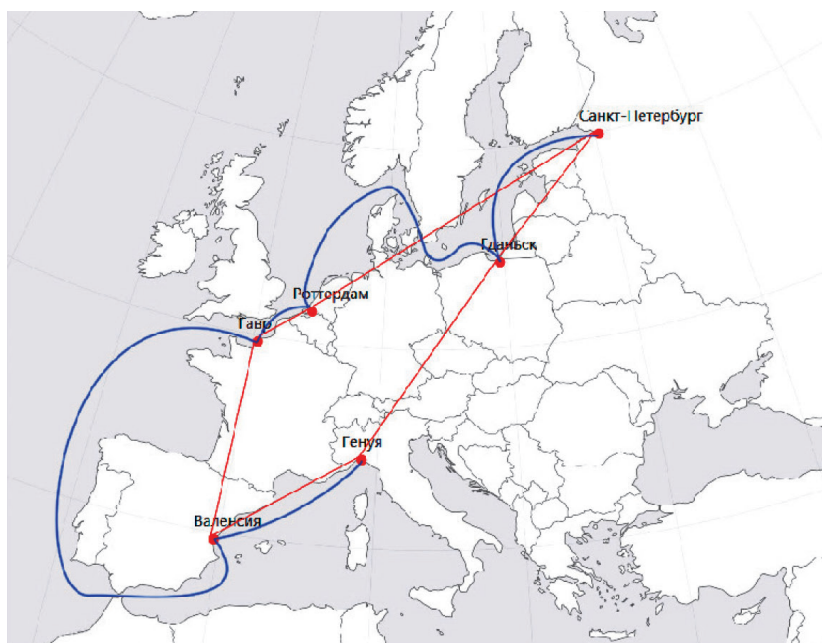


Рис. 3. Расстояния между портами

Условные обозначения:

красная линия — расстояние на основе евклидовых метрик;
синяя линия — фактические расстояния между морскими портами

Матрица расстояний имеет вид:

$$S = \begin{pmatrix} \text{Н / Д} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & \text{Н / Д} & \cdots & s_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & \text{Н / Д} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где n / d — обозначение «недействительного» перехода из порта i в порт j (длины таких переходов обозначаются таким способом, а не приравниваются нулю во избежание возникновения программных исключений, связанных с делением на нуль при работе модели); n — количество портов, входящих в ротацию кругового рейса судна.

Матрица расстояний в общем случае является симметричной относительно главной диагонали, т. е. для любых портов i и j справедливо равенство: $s_{ij} = s_{ji}$. В случае существенной разницы между переходами s_{ij} и s_{ji} в матрицу расстояний модели должны быть внесены соответствующие изменения.

Для учета возможных сложных переходов между некоторыми морскими портами вводится матрица коэффициентов сложности переходов:

$$K = \begin{pmatrix} n / d & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & n / d & \cdots & k_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & n / d \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Матрица K по умолчанию заполняется коэффициентами k_{ij} , равными единице для всех переходов. В случае наличия особенностей перехода между двумя портами, оказывающих влияние на скорость передвижения судна, соответствующий коэффициент должен находиться в диапазоне от $0 < k_{ij} \leq 1$. Чем меньше значение, присваиваемое коэффициенту сложности, тем выше сложность перехода. Альтернативной трактовкой этого коэффициента может быть отношение скорости, с которой приходится перемещаться судну, к его скорости на других переходах, где не возникает дополнительных сложностей.

Скорость судна в модели, задаваемая одной величиной v для всех переходов, представляет собой экономическую скорость, т. е. такую, при которой достигается минимальный расход топлива на единицу расстояния (морскую милю) [8]. Время кругового рейса судна в общем случае складывается из двух составляющих:

- времени переходов между портами, входящими в ротацию кругового рейса;
- времени стоянки судна в каждом порту.

Математически это можно выразить следующим образом:

$$T = \sum \frac{s_{ij}}{v k_{ij}} + \sum_{i=1}^n t_{\text{порт } i}, \quad (5)$$

где s_{ij} — расстояние перехода между портами i и j , морских миль (определяется по матрице S расстояний между портами); v — экономическая скорость судна, уз; k_{ij} — коэффициент сложности перехода между морскими портами i и j ; $t_{\text{порт } i}$ — время стоянки судна в порту i , ч.

Однако при решении задачи минимизации времени кругового рейса становится очевидным, что время, проводимое судном в морских портах, не влияет на критерий оптимальности решения, поскольку, вне зависимости от маршрута судна, оно совершит судозаходы во все порты. Слагаемое $\sum_{i=1}^n t_{\text{порт } i}$ будет присутствовать во всех решениях модели, независимо от рассматриваемого варианта рейса судна. Следовательно, нет необходимости учитывать это время при расчете критерия оптимальности рейса судна.

Критерий оптимальности, основанный на времени кругового рейса судна, может быть определен на основе следующей формулы:

$$T = \sum \frac{s_{ij}}{v k_{ij}}. \quad (6)$$

Критерий оптимальности, основанный на максимальном обслуживаемом грузообороте, рассчитывается на основе матрицы грузооборотов, строящейся по аналогии с матрицей расстояний между портами:

$$Q = \begin{pmatrix} \text{н / д} & Q_{12} & \dots & Q_{1n} \\ Q_{21} & \text{н / д} & \dots & Q_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{n1} & Q_{n2} & \dots & \text{н / д} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Однако в данном случае матрица Q не является симметричной, поскольку, как отмечалось ранее, для портов i и j будет справедливо выражение $Q_{ij} \neq Q_{ji}$.

Критерий оптимальности по грузообороту кругового рейса судна определяется на основе следующей формулы:

$$q = \sum Q_{ij}, \quad (8)$$

где i и j — соседние порты в последовательности захода в порты во время кругового рейса.

С точки зрения генетического алгоритма критерии T и q представляют собой целевые функции решений, называемые также *фитнесс-функциями*. Во время работы генетического алгоритма фитнес-функции рассчитываются на каждом шаге для каждого решения. Таким образом, при раз-
мере популяции решений, равном m , генетический алгоритм выполняет вычисления для каждого из m решений:

$$T_1 = \sum \frac{s_{ij}}{\text{в}k_{ij}}; \quad q_1 = \sum Q_{ij}; \quad (9)$$

$$T_2 = \sum \frac{s_{ij}}{\text{в}k_{ij}}; \quad q_2 = \sum Q_{ij}; \quad (10)$$

...

$$T_m = \sum \frac{s_{ij}}{\text{в}k_{ij}}; \quad q_m = \sum Q_{ij}. \quad (11)$$

Задача оптимизации генетического алгоритма в таком случае сводится к поиску таких T_x и q_x из множеств T и q , для которых справедливы следующие выражения:

$$T_x = \min(T); \quad (12)$$

$$q_x = \max(q), \quad (13)$$

где $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$; $q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$.

С точки зрения грузопотоков модель представляет собой систему пунктов зарождения и поглощения грузопотоков, обменивающихся грузами с привлечением морской перевозки. Минимальной неделимой единицей груза в модели принят один морской контейнер.

Каждый наземный пункт в модели может являться одновременно источником и потребителем грузопотоков. Таким образом, схему, приведенную на рис. 2, можно расширить, как это показано на рис. 4. В модели предполагается, что производители и потребители контейнеропотоков не соединены между собой сухопутными транспортными путями или, если соединены, то наземная перевозка априори менее рациональна, чем морская перевозка контейнера между ними. В модели также предполагается, что контейнеропоток, формируемый в наземном пункте, соединенном с морским портом наземными путями сообщения, не может в качестве пункта назначения иметь наземный пункт, соединенный с этим же морским портом. Например, на рис. 4 для контейнеров, отправляемых из источника грузопотока 1, пунктом назначения не может быть выбран потребитель грузопотока 2, поскольку они соединены наземной сетью путей сообщения с морским портом А.

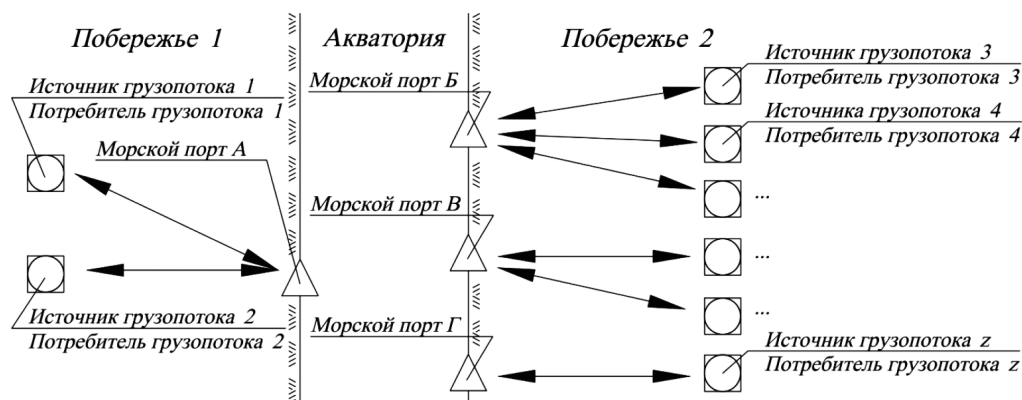


Рис. 4. Пример схемы взаимосвязей морских портов и их хинтерлендов

Разделение на побережья (см. рис. 4) — условное и не делает морскую перевозку грузов, например, из порта Б в порт В нерациональной.

Результаты (Results)

Динамическая модель сети распределения контейнерных грузов представляет собой автономное программное обеспечение, написанное на языке С#. В основе архитектуры программы лежит парадигма объектно-ориентированного программирования. Разработанная программа представляет собой совокупность объектов, которые могут вызывать друг друга для выбора и выполнения операций.

Последовательность портов, в которые совершаются судозаходы, представляет собой основу модели и является оптимизируемым решением. Остальные поля и методы этого класса служат оболочкой для данного поля, позволяя организовать корректное взаимодействие с ним.

Ссылки на матрицы расстояний и грузооборотов дают возможность обратиться к соответствующей матрице изнутри объекта-решения. Ссылки на матрицу расстояний и грузооборотов инициализируются в конструкторе объекта класса.

Методы расчета фитнес-функции по времени и расстоянию дают возможность определить значение целевой функции для решения.

Заключение (Conclusion)

Предлагаемая модель имеет ряд преимуществ над существующими актуальными разработками. Ее отличительной характеристикой является учет зарождения грузов в хинтерлендах морских портов, что позволяет проводить оптимизацию маршрутов с большей точностью из-за учета дополнительных вводных данных в виде точек зарождения и угасания грузопотоков, находящихся в хинтерлендах портов. Более того, модернизация методов генетических химер и упорядоченного кроссовера [9], [10] улучшает точность работы используемого в модели метода генетических алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галин А. В. Аналитический обзор методов маршрутизации судов в линейном контейнерном сервисе при сбое его работы / А. В. Галин, А. С. Малыхин // Транспортное дело России. — 2019. — № 2. — С. 162–164.
2. Галин А. В. Контейнеризация как очередной этап развития транспортных систем / А. В. Галин, Е. А. Давыденко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 6. — С. 996–1003. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-996-1003.
3. Кузнецов А. Л. Метод генетических химер для решения задачи рационализации маршрутов морской транспортировки / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Г. Б. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 456–467. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-456-467.

4. Manerba D. The traveling purchaser problem and its variants / D. Manerba, R. Mansini, J. Riera-Ledesma // *European Journal of Operational Research*. — 2017. — Vol. 259. — Is. 1. — Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.12.017.

5. Рафгарден Т. Совершенный алгоритм. Алгоритмы для NP-трудных задач / Т. Рафгарден. — СПб.: Питер, 2021. — 304 с.

6. Галин А. В. Анализ базовых механизмов рационализации маршрутов наземной транспортировки / А. В. Галин // *Транспортное дело России*. — 2013. — № 4. — С. 157–158.

7. Кормен Т. Х. Алгоритмы. Построение и анализ / Т. Х. Кормен [и др.]. — СПб: Вильямс, 2019. — 1328 с.

8. Шибаев А. Г. Скорости судов (терминология, понятие, содержание) / А. Г. Шибаев, О. В. Акимова // *Сборник научных трудов SWorld*. — 2014. — Т. 1. — № 2. — С. 24–31.

9. Мальных А. С. Оптимизация маршрута контейнерной линии на основе распределения грузов между портами и хинтерлендами / А. С. Мальных // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 861–867. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-861-867.

10. Kora P. Crossover operators in genetic algorithms: A review / P. Kora, P. Yadlapalli // *International Journal of Computer Applications*. — 2017. — Vol. 162. — Is. 10. — Pp. 34–36.

REFERENCES

1. Galin, A., and A. Malykhin. “Analytical review of methods of routing of vessels in the linear container service in case of failure of its work.” *Transport business of Russia* 2 (2019): 162–164.

2. Galin, Aleksandr V., and Evgeny A. Davydenko. “Containerization as the next stage in the development of transport systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.6 (2020): 996–1003. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-996-1003.

3. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and German B. Popov. “Chimerical genetic algorithm for sea route rationalization.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 456–467. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9=3-456-467.

4. Manerba, Daniele, Renata Mansini, and Jorge Riera-Ledesma. “The traveling purchaser problem and its variants.” *European Journal of Operational Research* 259.1 (2017): 1–18. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.12.017.

5. Roughgarden, Tim. *Algorithms Illuminated (Part 4): Algorithms for NP-Hard Problems*. Soundlikeyourself Publishing, LLC, 2020.

6. Galin, A. “Analyses of the basic mechanisms of land transportation routes rationalization.” *Transport business of Russia* 4 (2013): 157–158.

7. Cormen, Thomas H., Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, and Clifford Stein. *Introduction to Algorithms*. 3rd Edition. MIT Press, 2009.

8. Shibaev, A. G., and O. V. Akimova. “Skorosti sudov (terminologiya, ponyatie, sodержanie).” *Sbornik nauchnykh trudov SWorld* 1.2 (2014): 24–31.

9. Malykhin, Aleksandr S. “Container line route optimization based on cargo distribution between ports and hinterlands.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 861–867. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-861-867.

10. Kora, Padmavathi, and Priyanka Yadlapalli. “Crossover operators in genetic algorithms: A review.” *International Journal of Computer Applications* 162.10 (2017): 34–36.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галин Александр Валентинович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: galin2403@gmail.com,
kaf_uts@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galin, Aleksandr V. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: galin2403@gmail.com,
kaf_uts@gumrf.ru

Малыхин Александр Сергеевич — аспирант
Научный руководитель:
Галин Александр Валентинович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: contrship@yandex.ru,
kaf_uts@gumrf.ru

Malykhin, Aleksandr S. — Postgraduate
Supervisor:
Galin, Aleksandr V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: contrship@yandex.ru,
kaf_uts@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 13 июня 2021 г.
Received: June 13, 2021.*