

УДК 004.8

DOI: [10.26102/2310-6018/2022.38.3.014](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.38.3.014)

## Планирование маршрутов судов через акватории с интенсивным движением на основе ретроспективных данных

В.М. Гриняк<sup>1,2</sup>✉, А.С. Девятисильный<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,  
Владивосток, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения  
Российской академии наук,  
Владивосток, Российская Федерация  
[victor.grinyak@gmail.com](mailto:victor.grinyak@gmail.com)✉

**Резюме.** Статья посвящена задаче планирования маршрута перехода морского судна. При плавании в условиях интенсивного трафика судоводители должны придерживаться некоторой схемы движения, принятой на конкретной акватории. Эта схема может существовать в том числе и неформально, являясь обобщением коллективного судоводительского опыта. В этом случае представляется продуктивным планирование маршрута на основе данных о движении других судов, находившихся на акватории ранее (та же самая идея лежит в основе методов задач «больших данных»). В работах, опубликованных ранее, такое планирование маршрута основывалось на кластерном анализе ретроспективных данных о движении судов, что предполагало разбиение акватории на участки и выделение в них характерных значений скоростей и курсов. Проблемой такого подхода был выбор параметров разбиения, которые нужно было задавать для каждой конкретной акватории отдельно. В настоящей работе предложен другой подход, когда граф возможных маршрутов включает в себя выборку траекторий отдельных судов, реализованных на выбранной акватории ранее. В статье рассматривается способ построения такого графа возможных маршрутов, делается оценка числа его вершин и ребер, даются рекомендации по выбору метода поиска кратчайшего пути на этом графе. Обсуждается возможный метод интерполяции пропущенных данных, требуемых для построения графа, основанный на идее сочетания прямолинейных и маневренных участков движения судов. Приводятся примеры планирования маршрутов на ряде реальных акваторий: Владивосток, Токийский залив, Сангарский пролив.

**Ключевые слова:** безопасность судоходства, планирование маршрута, большие данные, Автоматическая идентификационная система, алгоритмы на графах, кратчайший путь.

**Благодарности:** работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект 20-38-90018.

**Для цитирования:** Гриняк В.М., Девятисильный А.С. Планирование маршрутов судов через акватории с интенсивным движением на основе ретроспективных данных. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2022;10(3). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1221> DOI: 10.26102/2310-6018/2022.38.3.014

## Ships route planning in heavy-traffic marine area based on historical data

V.M. Grinyak<sup>1,2</sup>✉, A.S. Devyatisilnyi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch Russian Academy of Science, Vladivostok, Russian Federation

[victor.grinyak@gmail.com](mailto:victor.grinyak@gmail.com)✉

**Abstract.** The paper considers the problem of planning a route for sea vessel shifting. Under the conditions of heavy traffic, navigators should follow the traffic scheme accepted in this defined water area. Such a pattern may not be officially established while representing collective experience in navigation. In this case, route planning based on the data on the movement of other ships that had been in this water area before (the same idea underlies the methods of "big data" tasks) appears to be productive. In the papers published earlier, such route planning employed a cluster analysis of retrospective data on the movement of ships, which involved dividing the water area into sections and isolating their characteristic values of speeds and courses. The problem with this approach was the choice of partitioning parameters, which had to be set for each specific water area separately. This paper proposes another approach when the graph of potential routes includes a selection of the trajectories of individual ships that had been previously implemented in the selected water area. The article regards a method for constructing such a graph of possible routes, estimates the number of its vertices and edges, and gives recommendations on the choice of a method for finding the shortest path on this graph. A possible method premised on the notion of combining straight and maneuverable sections of vessel traffic that can be applied to interpolate the missing data required to build a graph is discussed. Examples of route planning in a number of real water areas are given: Vladivostok, Tokyo Bay, the Tsugaru Strait.

**Keywords:** maritime safety, route planning, Big Data, Automatic identification system, graph algorithms, shortest path.

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

**For citation:** Grinyak V.M, Devyatisilnyi A.S. Ships route planning in heavy-traffic marine area based on historical data. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(3). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1221> DOI: 10.26102/2310-6018/2022.38.3.014 (In Russ.).

## Введение

Обеспечение навигационной безопасности движения является основной исследовательской и прикладной проблемой эксплуатации морских судов. В сложившейся отраслевой науке и ее практике принято рассматривать в контексте трех задач: оценки риска опасного сближения, предупреждения опасного сближения и планирования пути безопасного движения судна [1]. Целью первой задачи является информирование судоводителя о том, что у управляемого судна имеется риск столкновения с препятствием или сближения с ним на недопустимое расстояние. Предупреждение опасного сближения – это маневрирование управляемого судна, позволяющее избежать недопустимого сближения с препятствиями (выработка маневра уклонения). Планирование пути предполагает прогнозирование навигационной обстановки и расчет траектории судна в пространстве и времени таким образом, чтобы оно двигалось на достаточной от препятствий дистанции.

При плавании в условиях интенсивного движения упомянутых трех задач становится недостаточно. Так, при неупорядоченном, насыщенном и хаотичном трафике акватории риск опасного сближения будет выявляться слишком часто, выбор безопасных скоростей и курсов для совершения маневра уклонения будет затруднен, а планирование пути будет приводить к неудобным или нереализуемым траекториям, попаданию в «навигационные ловушки» и т. п. При таком трафике принято прибегать к дополнительному регулированию коллективного движения путем введения системы установления путей движения судов, задачей которой является исключение неопределенностей или возможности принятия ошибочных решений судоводителями. Другими словами, для акватории принимается некоторая схема движения в виде набора

ограничений («правил движения»). Считается, что судоводители должны придерживаться этой схемы, планировать согласно ей маршрут своего судна [2].

Схема движения судов на конкретной акватории может быть не только директивной. Нередко она существует неформально, как квинтэссенция многолетнего коллективного судоводительского опыта плавания в конкретных водах. В этом случае представляется продуктивной идея о планировании маршрута на основе данных о движении других судов, находившихся на акватории ранее.

В уже опубликованных работах авторами предлагались модельные представления задачи планирования маршрута, основанные на кластерном анализе ретроспективных данных о движении судов [3-5]. В настоящее время такие данные предоставляются специализированными информационными сервисами (например, *marinetraffic.com*).

Разработанные методы предполагали разбиение акватории на участки и выделение в них характерных значений скоростей и курсов судов. На основе полученных данных строился граф возможных маршрутов судна, на котором осуществлялся поиск наиболее подходящего маршрута перехода от начальной до конечной точки. Таким образом маршрут перехода через акваторию с интенсивным движением планировался так, что судно придерживалось наиболее «популярных» скоростей и курсов на том или ином участке акватории.

Основной проблемой предложенного подхода был выбор разбиения акватории. Чрезмерно «мелкие» участки не давали достаточной для адекватной кластеризации выборки данных в тех местах, где интенсивность движения судов невелика. Напротив, «большие» участки не позволяли учесть некоторые особенности схемы движения, например, фарватеры с двусторонним движением. Решением этой проблемы могла бы стать многомерная кластеризация данных о движении, включающая в свои параметры и координаты, и скорости, и курсы судов. Несмотря на то, что подходящие для такой кластеризации методы существуют, они требуют «настройки» – задания параметров алгоритма, выбор которых в общем случае неочевиден.

В настоящей работе предлагается еще один метод планирования маршрута, в котором граф возможных маршрутов строится на основе траекторий отдельных судов, реализованных на выбранной акватории ранее. Новый метод требует существенно меньшего объема ретроспективных данных, чем у тех, что связаны с кластеризацией, и исключает неопределенности, связанные с подбором внутренних параметров алгоритма.

### Материалы и методы

Положим, что траектория судна задается множеством кортежей  $\{LAT_i, LON_i, SPEED_i, COURSE_i, TIME_i\}$ , где  $i$  – номер кортежа,  $LAT_i$  и  $LON_i$  – географические широта и долгота,  $SPEED_i$  и  $COURSE_i$  – скорость и курс,  $TIME_i$  – момент времени, к которому они относятся (примерно в таком формате данные о движении судов предоставляются специализированными информационными сервисами). Введем систему координат, где ось абсцисс соответствует долготе, а ось ординат – широте. Тогда путь, пройденный судном, будет задан ломаной линией с вершинами  $\{LAT_i, LON_i\}$ . Если имеются ретроспективные данные о движении  $N$  судов, это соответствует  $N$  ломаным  $\{LAT_i, LON_i\}_{j, j = \overline{1, N}}$ .

Сформируем из указанных ломаных граф возможных маршрутов судна. Имея в виду характер имеющихся траекторных данных, такой граф будет ориентированным. На первом этапе включим в него все вершины ломаных и все их ребра (с учетом ориентированности). На втором этапе дополним множество вершин графа точками пересечения ломаных, а множество ребер – новыми ребрами, обеспечивающими связность этим точкам пересечений (Рисунок 1).

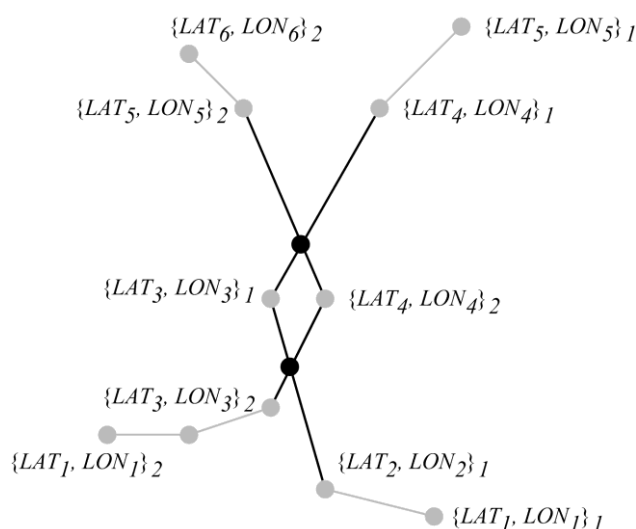


Рисунок 1 – Формирование графа возможных маршрутов судна на основе ретроспективных данных

Figure 1 – Graph of possible ship routes based on historical data

Рисунок 1 иллюстрирует такой способ дополнения графа новыми вершинами и ребрами. Показаны пути двух судов. Светло-серые точки и линии – это вершины и ребра графа, сформированные по исходным данным о движении. Черные точки и линии – дополнительные вершины и ребра. В показанном на Рисунке 1 случае есть две точки пересечения ломаных, им инцидентны по два дополнительных ребра.

Вес ребер может выбираться различными способами. В простейшем случае (именно такой имеется в виду в приведенных ниже расчетах) он равен длине дуги Большого круга, соединяющей инцидентные ребру вершины. Иногда при выборе маршрута судна необходимо также учесть «популярность» того или иного пути, реализованного в ретроспективных данных о движении. Тогда вес ребра уменьшается пропорционально количеству судов, проследовавших похожим образом.

Поиск кратчайшего пути на рассматриваемом графе может осуществляться известными детерминированными методами: Дейкстры, Беллмана-Форда и др [6]. При выборе метода следует иметь в виду ориентированность графа, его разреженность и отсутствие ребер с отрицательными весами. Вычислительная сложность популярных алгоритмов поиска пропорциональна квадрату количества вершин в графе. Такая же сложность будет иметь место при построении графа – при поиске точек пересечения ломаных. Ретроспективные данные о движении на акваториях с интенсивным трафиком могут содержать записи порядка  $5 \times 10^3$  траекторий в сутки, каждая из которых содержит до нескольких тысяч точек. Таким образом, построение графа и поиск на нем кратчайшего пути в случае акватории с интенсивным движением потребует порядка  $10^{13}$  шагов алгоритма. Разумеется, такое большое число операций реализуется лишь в отдельных («наихудших») случаях, и в целом время решения задачи является приемлемым для практики при использовании современных программных и вычислительных средств общего назначения. Это подтверждается и дальнейшими примерами расчетов.

Если данные трафика акватории берутся за длительный период времени (месяц, год), граф возможных маршрутов судна будет содержать на 1-2 порядка больше вершин и ребер, что затрудняет поиск на нем кратчайшего пути детерминированными методами. В этом случае могут использоваться методы эвристического типа (например,

генетический или алгоритм муравьиной колонии [7-10]). Хотя найденный таким образом путь и не будет оптимальным, он будет приемлемым для практики.

### Результаты

Приведенные далее расчеты проводились на массивах данных о движении судов, собранных с ресурса *marinetraffic.com* с помощью специально разработанной программы.

На Рисунке 2 показаны результаты планирования маршрутов судов, движущихся в акватории, прилегающей к порту Владивосток, для расчетов были взяты данные о движении в течение одних суток.

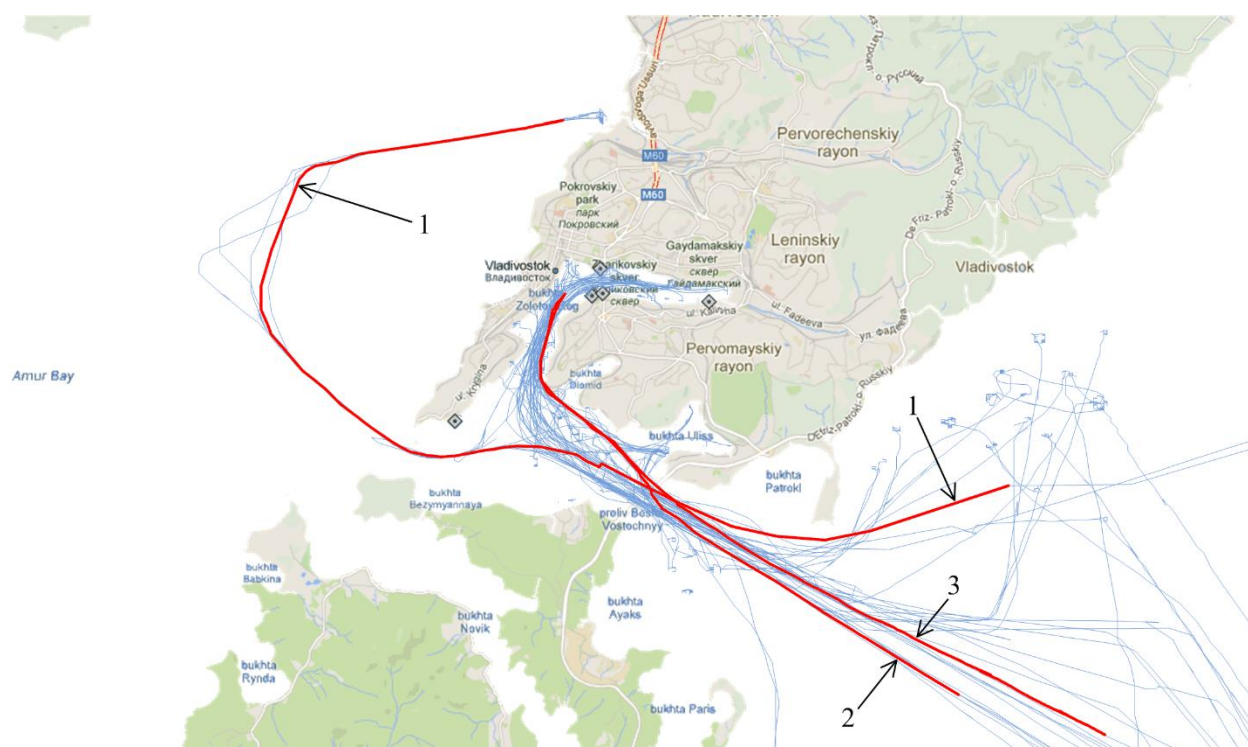


Рисунок 2 – Результаты поиска маршрута в акватории порта Владивосток  
 Figure 2 – Results of route planning near the Seaport of Vladivostok

Светло-синими линиями показаны траектории судов, использованные для построения графа возможных маршрутов (около 300 тыс. вершин). Красными линиями показаны несколько рассчитанных маршрутов:

- от места якорной стоянки в Уссурийском заливе до нефтепорта на Первой речке (линия 1),
- от района торгового порта до выхода из порта к Уссурийскому заливу через пролив Босфор Восточный (линия 2);
- из Уссурийского залива в район торгового порта (линия 3).

На Рисунке 3 приведены результаты планирования маршрутов в Сангарском проливе, для расчетов были взяты данные о движении в течение одних суток, что дало граф возможных маршрутов (светло-синие линии), содержащий около 100 тыс. вершин.

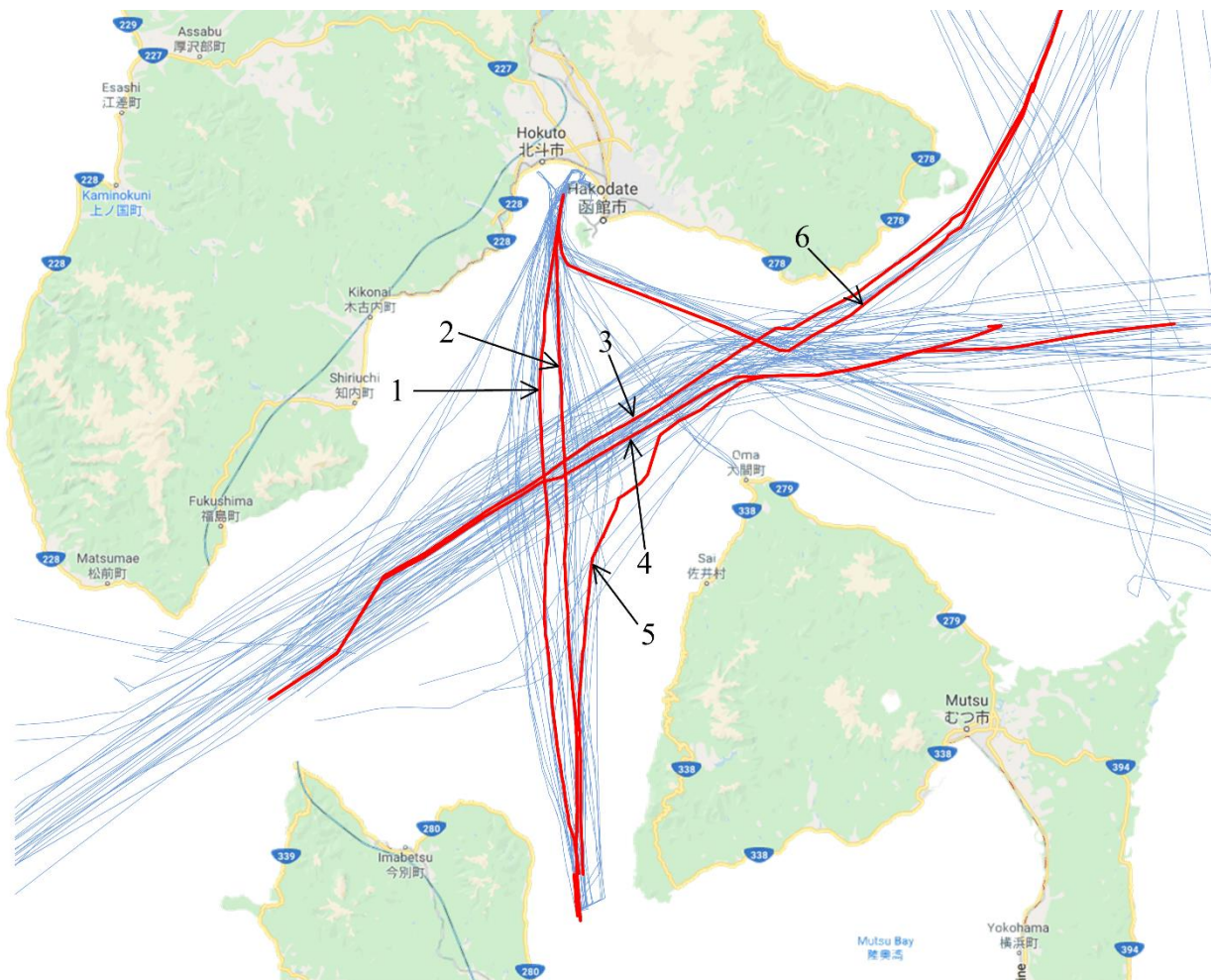


Рисунок 3 – Результаты поиска маршрута в Сангарском проливе  
Figure 3 – Results of route planning in the Tsugaru Strait

Красными линиями показаны следующие маршруты:

- порт Хакодате – залив Муцу (линия 1),
- залив Муцу – порт Хакодате (линия 2),
- Тихий океан (вход с северо-востока) – Японское море (линия 3),
- Японское море – Тихий океан (выход на восток, линия 4),
- залив Муцу – Тихий океан (выход на восток, линия 5),
- порт Хакодате – Тихий океан (выход на северо-восток, линия 6).

На Рисунке 4 показано планирование маршрутов в Токийском заливе, для расчетов были использованы данные о движении судов в течение 6 часов, что сформировало граф возможных маршрутов из примерно 300 тыс. вершин (светло-синие линии). Красными линиями показаны следующие маршруты:

- порт Иокогама – устье залива (линия 1),
- район Кавасаки – устье залива (линия 2),
- устье залива – район Кавасаки (линия 3),
- устье залива – район Тиба (линия 4).

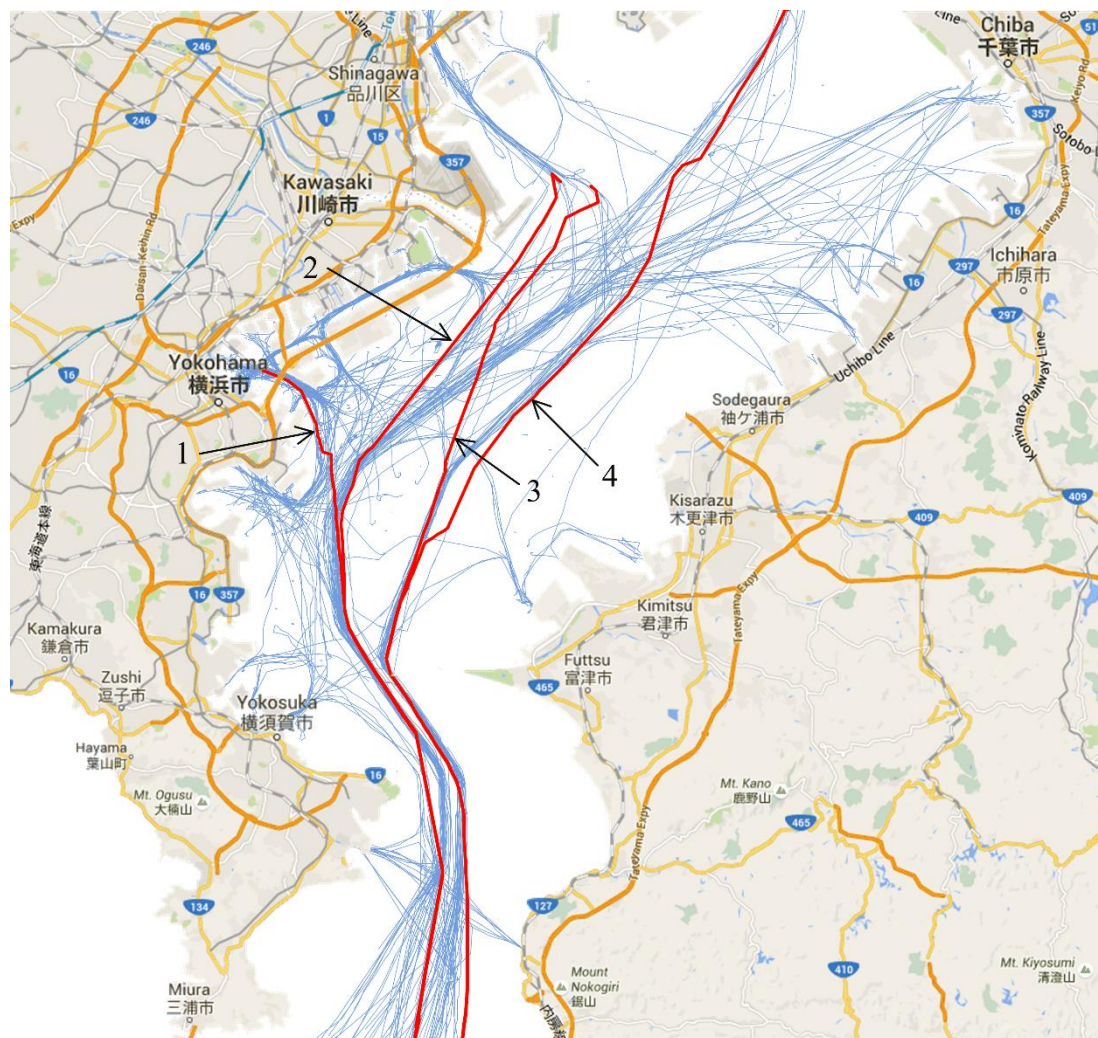


Рисунок 4 – Результаты поиска маршрута в Токийском заливе  
Figure 4 – Results of route planning in Tokyo Bay

Приведенные на Рисунках 2-4 данные демонстрируют адекватное решение задачи планирования маршрутов таким образом, чтобы суда двигались по характерным для выбранной акватории траекториям. Так, маршруты 2 и 3 Рисунка 2, 1 и 2 Рисунка 3, 2 и 3 Рисунка 4 принимают правильную сторону движения (в судовождении принято правостороннее движение). Наблюдаемая «изломанность» некоторых маршрутов (1 на Рисунке 2, 5 на Рисунке 3, 4 на Рисунке 4 и др.) связана с ограниченным набором исходных данных и может быть устранена увеличением выборки. Существенным недостатком рассчитанных траекторий является отсутствие учета «популярности» того или иного пути, таким образом формируется кратчайший из возможных маршрутов, но не самый реализуемый в ретроспективных данных. Этот эффект виден, например, на Рисунке 2: маршруты 2 и 3 проходят вблизи берега, хотя большая часть судов проходит на некотором удалении от него. Обозначенный учет «популярности» траектории возможен путем оценки «влияния» ребер графа возможных маршрутов друг на друга с использованием различных эвристик. Этой задаче авторы планируют посвятить отдельное исследование.

## Обсуждение

Как уже было отмечено, на акваториях с интенсивным движением граф возможных маршрутов может содержать порядка  $10^6 - 10^8$  вершин и ребер (если для его формирования берутся данные о движении в течение нескольких суток). Поскольку граф формируется один раз, а его построение может осуществляться постепенно, по мере накопления данных, это не представляет проблемы с точки зрения вычислительной сложности задачи поиска пересечений ломаных. Поиск на таком графе маршрутов небольшой протяженности, состоящих из нескольких десятков или сотен ребер, вполне осуществим известными детерминированными методами за приемлемое время. Для протяженных маршрутов, состоящих из тысяч ребер, возможно использование эвристических методов.

Данные о движении судов, получаемые с использованием сервисов Автоматической идентификационной системы (именно такие данные доступны на открытых интернет-ресурсах), имеют ряд особенностей. Одна из них – пропуски данных. Так, на ресурсе *marinetraffic.com* характерный интервал обновления данных равен одной минуте, он реализуется для маневрирующих судов. Для судов, движущихся прямолинейно и равномерно данные обновляются реже, их период обновления может быть от нескольких минут до нескольких десятков минут и даже нескольких часов. В том случае, если такие пропуски данных приводят к сильному искажению маршрутов судов (отрезки траектории пересекают сушу, проходят по запрещенным для плавания районам и т. п.) следует прибегнуть к интерполяции траекторий судов, позволяющей частично устранить влияние чрезмерной разреженности данных. Такая интерполяция должна учитывать не только геометрию траектории, но и специфическую механику движения судов, сочетание прямолинейных и маневренных участков движения; популярные методы интерполяции (полиномы, сплайны) для этого не применимы. Рассмотрим возможный подход для интерполяции траектории судна на основе данных о его координатах, курсах и скоростях.

Вначале перейдем от географической к прямоугольной системе координат. Такой переход зависит от принятой модели поверхности Земли. Для акваторий размером в несколько десятков километров и не находящихся в высоких широтах можно с хорошей степенью приближения считать Землю шаром известного радиуса  $R$  и использовать следующие формулы преобразования координат:

$$x = R(LON - LON_*)\cos(LAT_*),$$

$$y = R(LAT - LAT_*),$$

где  $LON$  и  $LAT$  – долгота и широта точки на поверхности моря,  $LON_*$  и  $LAT_*$  – долгота и широта точки, принятой за начало прямоугольной системы координат.

Рассмотрим один из отрезков траектории судна. Пусть известны координаты и компоненты вектора скорости судна в начале –  $x(t_1), y(t_1), v_x(t_1), v_y(t_1)$  – и в конце –  $x(t_2), y(t_2), v_x(t_2), v_y(t_2)$  – отрезка. Разобьем отрезок на участок равномерного прямолинейного движения и участок равноускоренного движения (Рисунок 5).



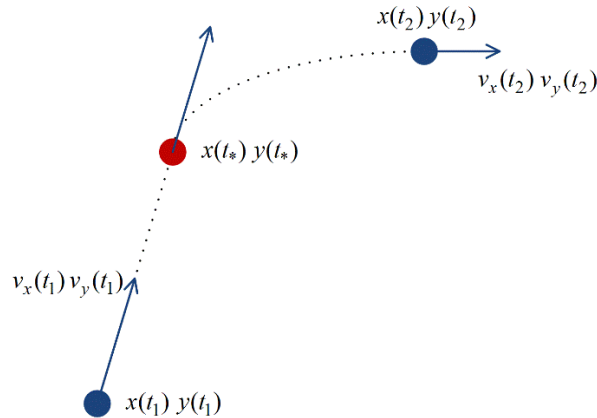


Рисунок 5 – Отрезок траектории судна. Красным обозначена точка с неизвестными координатами

Figure 5 – Segment of the ship's trajectory. A point with unknown coordinates is marked as red

Положим, что из точки  $x(t_1)$ ,  $y(t_1)$  в точку  $x(t_*)$ ,  $y(t_*)$  судно движется прямолинейно с постоянной скоростью  $v_x(t_1)$ ,  $v_y(t_1)$ . Из точки  $x(t_*)$ ,  $y(t_*)$  судно начинает движение со скоростью  $v_x(t_*)$ ,  $v_y(t_*)$  и равноускоренно движется в точку  $x(t_2)$ ,  $y(t_2)$ , где достигает скорости  $v_x(t_2)$ ,  $v_y(t_2)$ . Это соответствует следующим шести уравнениям движения:

$$\begin{aligned} x(t_*) &= x(t_1) + v_x(t_1)(t_* - t_1), \\ y(t_*) &= y(t_1) + v_y(t_1)(t_* - t_1), \\ x(t_2) &= x(t_*) + v_x(t_*) (t_2 - t_*) + \frac{a_x(t_2 - t_*)^2}{2}, \\ y(t_2) &= y(t_*) + v_y(t_*) (t_2 - t_*) + \frac{a_y(t_2 - t_*)^2}{2}, \\ a_x &= \frac{v_x(t_2) - v_x(t_*)}{t_2 - t_*}, \\ a_y &= \frac{v_y(t_2) - v_y(t_*)}{t_2 - t_*}. \end{aligned}$$

Величины  $x(t_1)$ ,  $y(t_1)$ ,  $v_x(t_1)$ ,  $v_y(t_1)$ ,  $x(t_2)$ ,  $y(t_2)$ ,  $v_x(t_2)$ ,  $v_y(t_2)$  соответствуют исходным данным и считаются известными, величины  $x(t_*)$ ,  $y(t_*)$ ,  $t_1$ ,  $t_*$ ,  $t_2$  неизвестны. Полагая для определенности, что  $t_1 = 0$ , подставим пятое и шестое уравнения соответственно в третье и четвертое, получив систему из четырех линейных алгебраических уравнений относительно величин  $x(t_*)$ ,  $y(t_*)$ ,  $t_*$ ,  $t_2$ . Решая эту систему уравнений, получим параметры движения судна из точки  $x(t_1)$ ,  $y(t_1)$  в точку  $x(t_2)$ ,  $y(t_2)$ , на основе которых можно интерполировать его траекторию.

Задача планирования маршрута на основе ретроспективных данных трафика акватории неоднократно привлекала внимание исследователей. Одной из первых работ на эту тему является статья [11]. В ней обсуждаются особенности траекторных данных, предоставляемых Автоматической идентификационной системой, и делается вывод о возможности применения к ним идей кластеризации. В статье дается обзор возможных математических методов, приводятся результаты решения различных прикладных задач: выявления областей якорных стоянок, точек входа и выхода из акваторий, оценки конфигурации регулярных судопотоков и их интенсивности. Уделено внимание задаче оценки аномалий в движении судов. Предлагаются модельные представления задачи

планирования маршрута, в основе которых лежат кластеризация и методы теории вероятностей, приводятся примеры расчетов маршрутов в северной части Адриатического моря. Недостатком предложенного подхода является необходимость подбора методов кластеризации траекторных данных и их параметров, которые будут неодинаковы для акваторий с различными особенностями трафика.

Задача планирования маршрута решается также в работе [12]. В основе предложенного метода лежит разбиение акватории на небольшие участки и оценка характерных значений курса судов при прохождении каждого из них. На основе полученных данных оценивается возможность перехода судна от участка к участку, то есть неявно формируется граф возможных маршрутов судов, после чего находится подходящий маршрут от начальной до конечной точки. Недостатком метода является необходимость подбора параметров разбиения акватории и «изрезанность» полученной в результате траектории судна, требующей дополнительного сглаживания.

Работа [13] посвящена исследованию одного из возможных подходов к кластеризации траекторных данных, когда в качестве объектов кластеризации выступают ломаные (траектории судов, прошедших по акватории ранее), а в качестве метрики расстояния – характерное расстояние между точками ломаных. В результате решения задачи выделяются «пучки» маршрутов судов, характерных для выбранной акватории. Используется метод кластеризации k-medoids. Похожий подход реализован и в работе [14], где для кластеризации используется метод DBSCAN. Хотя центральный результат этих исследований – выявление аномально движущихся объектов, авторы отмечают возможность планирования маршрутов на основе выделенных паттернов движения. Недостатком подхода также является необходимость подбора параметров алгоритмов кластеризации.

Наконец, в работе [15] также предлагается метод выявления аномального поведения судов с точки зрения характерных для того или иного участка акватории параметров движения. Такие нормативные параметры могут использоваться для планирования маршрута. Недостатком подхода, как и в других работах, является разбиения акватории на небольшие участки, что порождает проблему выбора их размеров, «точки отсчета» и дискретность результата.

Предложенный в настоящей работе метод планирования маршрутов лишен всех этих недостатков.

### **Заключение**

В статье рассматривается метод решения задачи планирования маршрута перехода судна таким образом, чтобы учитывать судоводительский опыт и схему движения судов, сложившуюся на конкретной акватории. В отличие от широко известных подходов, предложенный метод не использует кластеризацию, а строит граф возможных маршрутов как множество пересекающихся ломаных, представляющих собой траектории судов, прошедших по акватории ранее. Отсутствие явной кластеризации данных позволяет уйти от необходимости выбора подходящего метода кластеризации и подбора его параметров.

На акваториях с интенсивным движением количество траекторий судов в исходных данных может исчисляться несколькими тысячами, каждая из которых может содержать до нескольких тысяч отрезков. Построение графа возможных маршрутов связано с традиционной задачей геометрического моделирования – поиском точек пересечения отрезков. В случае большого объема исходных данных эта задача будет иметь высокую вычислительную сложность. Вместе с тем формирование графа возможных маршрутов может происходить постепенно, по мере накопления данных и

вполне реализуемо на практике. Поиск подходящего (кратчайшего) пути на таком графе также будет вычислительно сложной задачей, в случае протяженных маршрутов он может осуществляться алгоритмами эвристического типа.

Источником данных о движении судов на акватории являются сервисы Автоматической идентификационной системы, доступные на существующих интернет-ресурсах. Одной из особенностей этих данных является их разреженность, что иногда может приводить к построению некорректных элементов графа возможных маршрутов судна. В статье предложен способ доопределения (интерполяции) пропущенных данных, основанный на чередовании равномерных и ускоренных участков движения.

В работе приведены примеры расчетов маршрутов перехода судов через некоторые акватории (Владивосток, Сангарский пролив, Токийский залив). Из приведенных примеров видно, что найденные маршруты достаточно хорошо отражают характерные особенности трафика, что подтверждает перспективность практического использования предложенного подхода.

### 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. DOI: 10.1017/S0373463308005134.
2. *Общие положения об установлении путей движения судов*. Издание ГУНиО МО СССР; 1987. № 9036.
3. Гриняк В.М., Иваненко Ю.С., Люлько В.И., Шуленина А.В., Шурыгин А.В. Цифровое представление и комплексная оценка навигационной безопасности движения на морских акваториях. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(1):40–41. DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.003.
4. 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). DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.018.
5. Grinyak V.M., Shulenina A.V., Ivanenko Yu.S. Ship routes planning based on traffic clustering. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;13:012080. DOI: 10.1088/1742-6596/1864/1/012080.
6. Чертков А.А. Автоматизация выбора кратчайших маршрутов судов на основе модифицированного алгоритма Беллмана-Форда. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2017;9(5):1113–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.
7. 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. DOI:10.1017/S0373463318000048.
8. Lazarowska A. Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony optimisation. *Journal of Navigation*. 2015;68(2):291–307. DOI: 10.1017/S0373463314000708.
9. Першина Л.А., Астреина Л.Б. Выбор маршрута судна на основе погодных условий. *Эксплуатация морского транспорта*. 2019;(2):30–38.
10. Федоренко К.В., Оловяников 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. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-714-723.
11. Pallotta G., Vespe M., Bryan K. Vessel pattern knowledge discovery from AIS data: a framework for anomaly detection and route prediction. *Entropy*. 2013;15:2218–2245.
  12. Naus K. Drafting route plan templates for ships on the basis of AIS historical data. *Journal of Navigation*. 2019;73(3):726–745.
  13. Zhen R., Jin Y., Hu Q., Shao Zh., Niktakos N. Maritime anomaly detection within coastal waters based on vessel trajectory clustering and naïve Bayes classifier. *Journal of Navigation*. 2017;70(3):648–670.
  14. Zhao L., Shi G. Maritime anomaly detection using density-based clustering and recurrent neural network. *Journal of Navigation*. 2019;72(4):894–916.
  15. Tang H., Wei L., Yin Y., Shen H., Qi Y. Detection of abnormal vessel behaviour based on probabilistic directed graph model. *Journal of Navigation*. 2019;73(5):1014–1035.

## 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. DOI: 10.1017/S0373463308005134.
2. *Obshchiye polozheniya ob ustanovlenii putey dvizheniya sudov*. Izdaniye GUNiO MO SSSR; 1987. № 9036. (In Russ.).
3. Grinyak V.M., Ivanenko Y.S., Lulko V.I., Shulenina A.V., Shurygin A.V. Multi-measure navigation safety estimation and digital represent for marine area. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = Modelling, Optimization and Information Technologies*. 2020;8(1):40–41. (In Russ.).
4. 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). DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.018. (In Russ.).
5. Grinyak V.M., Shulenina A.V., Ivanenko Yu.S. Ship routes planning based on traffic clustering. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;13:012080. DOI: 10.1088/1742-6596/1864/1/012080.
6. Chertkov A.A. Avtomatizatsiya vybora kratchajshih marshrutov sudov na osnove modifitsirovannogo algoritma Bellmana-Forda. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2017;9(5):1113–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122. (In Russ.).
7. 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. DOI:10.1017/S0373463318000048.
8. Lazarowska A. Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony otimisation. *Journal of Navigation*. 2015;68(2):291–307. DOI: 10.1017/S0373463314000708.
9. Pershina L.A., Astreina L.S. Ship routing based on weather conditions. *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. 2019;(2):30–38. (In Russ.).
10. Fedorenko K.V., Olovyannikov A.L. Issledovanie osnovnyh parametrov geneticheskogo algoritma primenitel'no k zadache poiska optimal'nogo marshruta. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2017;9(4):714–723. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-714-723. (In Russ.).

11. Pallotta G., Vespe M., Bryan K. Vessel pattern knowledge discovery from AIS data: a framework for anomaly detection and route prediction. *Entropy*. 2013;15:2218–2245.
12. Naus K. Drafting route plan templates for ships on the basis of AIS historical data. *Journal of Navigation*. 2019;73(3):726–745.
13. Zhen R., Jin Y., Hu Q., Shao Zh., Niktakos N. Maritime anomaly detection within coastal waters based on vessel trajectory clustering and naïve Bayes classifier. *Journal of Navigation*. 2017;70(3):648–670.
14. Zhao L., Shi G. Maritime anomaly detection using density-based clustering and recurrent neural network. *Journal of Navigation*. 2019;72(4):894–916.
15. Tang H., Wei L., Yin Y., Shen H., Qi Y. Detection of abnormal vessel behaviour based on probabilistic directed graph model. *Journal of Navigation*. 2019;73(5):1014–1035.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Гриняк Виктор Михайлович**, доктор технических наук, доцент, кафедра Информационных технологий и систем, Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Владивосток, Российская Федерация.

*e-mail:* [victor.grinyak@gmail.com](mailto: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 at Information Technologies Department, Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, Russian Federation.

**Девятисильный Александр Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, сектор Управления и навигации, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Российская Федерация.

*e-mail:* [devyatis@dvo.ru](mailto:devyatis@dvo.ru)

**Aleksandr S. Devyatisilnyi**, Doctor of Technical Sciences, Professor at Navigation and Control Department, Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, Vladivostok, Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 26.08.2022; одобрена после рецензирования 14.09.2022; принята к публикации 22.09.2022.*

*The article was submitted 26.08.2022; approved after reviewing 14.09.2022; accepted for publication 22.09.2022.*