

УДК 004.8

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.41.2.015](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.015)

## Планирование маршрутов судов по ретроспективным данным о движении на основе модельных представлений вычислительной геометрии

В.М. Гриняк<sup>1✉</sup>, Л.И. Прудникова<sup>2</sup>, А.В. Артемьев<sup>3</sup>, Д.М. Левченко<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет,  
Владивосток, Российская Федерация

<sup>3</sup>Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,  
Владивосток, Российская Федерация

<sup>4</sup>Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,  
Владивосток, Российская Федерация  
[victor.grinyak@gmail.com](mailto:victor.grinyak@gmail.com)✉

**Резюме.** Статья посвящена проблеме безопасного движения судов в условиях насыщенного трафика. Рассматривается задача планирования маршрута перехода морского судна через акватории с интенсивным движением. При плавании в таких условиях судоводители придерживаются некоторой схемы движения, принятой на конкретной акватории. Эта схема может существовать как директивно, так и неформально, являясь обобщением коллективного судоводительского опыта. В последнем случае представляется продуктивным планирование маршрута на основе данных о движении других судов, находившихся на акватории ранее (та же идея лежит в основе методов задач «больших данных»). В работах, опубликованных ранее, такое планирование маршрута осуществлялось на основе кластерного анализа ретроспективных данных о движении судов, что предполагало разбиение акватории на участки и выделение в них характерных значений скоростей и курсов. Проблемой такого подхода является выбор параметров разбиения: их требуется задавать для каждой конкретной акватории отдельно. В настоящей работе предложен другой подход, когда граф возможных маршрутов строится на основе множества пересекающихся ломаных, каждая из которых представляет собой реализованный ранее маршрут. При этом каждому ребру графа приписывается мера его «желательности», характеризующая близость к нему других ребер. Кратчайший путь на взвешенном графе строится с учетом не только геометрической длины ребер, но и меры их «желательности». 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. Приводятся примеры планирования маршрутов на ряде реальных акваторий: Владивосток, Сангарский пролив.

**Ключевые слова:** управление движением судов, безэкипажное судоходство, е-навигация, планирование маршрута перехода, интенсивное движение, автоматическая идентификационная система, большие данные, алгоритмы на графах.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках программы академического стратегического лидерства «Приоритет-2030», проект «Разработка алгоритмов автоматического расхождения судов в соответствии с МППСС-72, оценка их эффективности и безопасности».

**Для цитирования:** Гриняк В.М., Прудникова Л.И., Артемьев А.В., Левченко Д.М. Планирование маршрутов судов по ретроспективным данным о движении на основе модельных представлений вычислительной геометрии. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1331> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.015

# Vessel route planning based on historical traffic data and model representations of computational geometry

V.M. Grinyak<sup>1</sup>, L.I. Prudnikova<sup>2</sup>, A.V. Artemiev<sup>3</sup>, D.M. Levchenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Vladivostok State University, Vladivostok, the Russian Federation

<sup>2</sup>Far Eastern Federal University, Vladivostok, the Russian Federation

<sup>3</sup>Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, the Russian Federation

<sup>4</sup>Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, Vladivostok, the Russian Federation  
[victor.grinyak@gmail.com](mailto:victor.grinyak@gmail.com)

**Abstract.** The paper is concerned with maritime safety. The problem of planning a route for a vessel crossing water areas with heavy traffic is considered. When sailing under such conditions, navigators follow a trajectory that is established in a specific water area. It can be defined officially or be accepted on an informal basis while representing collective navigation experience. If the latter, it seems productive to plan a route using the data on the traffic of other ships that crossed the water area earlier (the same idea underlies "big data" task methods). In the papers published earlier, such route planning was based on a cluster analysis of retrospective data on ship traffic, which involved dividing the water area into sections and highlighting characteristic values of speeds and courses in them. The problem with this approach was the choice of partitioning parameters which had to be set for each specific water area separately. In this paper, another approach is proposed, when the graph of possible routes includes a selection of the trajectories of individual ships that were previously implemented in the specific water area. This article further develops the methods for solving the problem of ship route planning in areas with heavy traffic. The proposed method is based on the formation of a possible route graph from a set of intersecting broken lines, each of which represents a route implemented earlier. Each edge of the graph is assigned a measure of its "popularity", which characterizes the proximity of other edges to it. The shortest path on a weighted graph is constructed considering not only the geometric length of the edges, but also the measure of their "popularity". The paper regards the formation of a possible route graph, a number of its nodes and edges is esteemed, recommendations as to how to select a method for defining the shortest path on its graph are provided. Examples of route planning for the Tsugaru Strait and the Seaport of Vladivostok are provided.

**Keywords:** ship traffic management, unmanned navigation, e-navigation, route transit planning, high-density traffic, automatic identification system, Big Data, graph algorithm.

**Acknowledgements:** this research was supported by the program of academic leadership "Prioritet-2030", project "Development of algorithms for vessels collision avoidance in accordance with COLREGs-72, assessment of their effectiveness and safety".

**For citation:** Grinyak V.M., Prudnikova L.I., Artemiev A.V., Levchenko D.M. Vessel route planning based on historical traffic data and model representations of computational geometry. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1331> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.015 (In Russ.).

## Введение

На сегодняшний день создание и внедрение безэкипажных судов является объектом пристального внимания со стороны исследователей и инженеров. На эту область также обратили внимание регулирующие службы и конструкторско-технологические организации. В отраслевой среде сложилось понимание, что гражданские автономные суда в скором времени станут объективной реальностью и именно они будут определять будущее развитие водного транспорта [1-3]. Существуют и активно внедряются в повседневную практику все технические предпосылки безэкипажного судоходства: навигационные системы, электронная картография,

системы связи, автоматическая идентификационная система (АИС), интеграция навигационных данных (Е-Навигация), оптические системы наблюдения, автоматические системы управления судном, новые поколения судовых двигателей и источников электроэнергии [4, 5].

Движение по заданной (программной) траектории является классической задачей судовождения [6]. Для автономных судов одной из основных проблем является определение программной траектории таким образом, чтобы она соответствовала общим правилам судоходства (МППСС), критериям оптимальности (движение по кратчайшему пути, за наименьшее время и т. п.), судоводительской практике в конкретном районе и т. п. [7]. В исследовательском контексте такое определение программной траектории соответствует задаче планирования маршрута перехода судна. Она имеет два аспекта: планирование маршрута перехода между портами (на «больших» расстояниях) и планирование маршрута перехода на конкретной акватории (на «малых» расстояниях). «Большой» вариант задачи хорошо разработан, известно много зарекомендовавших себя классических подходов его моделирования и решения [8-10]. «Малый» вариант не так хорошо изучен, эта задача возникает при движении судна в условиях интенсивного движения и в ограниченных водах. Здесь основным критерием является навигационная безопасность движения и следование принятым в районе правилам и ограничениям [11].

В условиях высокой интенсивности трафика навигационная безопасность может быть обеспечена только путём координации совместных действий всех участников движения, в том числе – введением системы установления путей движения судов [12]. В этом случае судоводители должны придерживаться некоторой схемы движения, принятой на акватории и планировать согласно ей свой маршрут [13]. Такая схема может существовать как директивно, так и неформально, являя собой своего рода проявление собирательного коллективного судоводительского опыта плавания в конкретных водах. В этом случае планирование маршрута возможно на основе данных о движении других судов, находившихся на акватории ранее (*«будем двигаться так, как другие двигались до нас»*).

Развитие средств Е-Навигации открыло доступ к ретроспективным данным о трафике акваторий не только их владельцам и регулирующим организациям, но и широкому кругу пользователей (что открывает возможности для инноваций). Для них в качестве источников таких данных могут служить специализированные информационные сервисы (например типа *marinetraffic.com*).

В работах, опубликованных ранее, авторами уже исследовались возможные подходы к планированию маршрута на основе ретроспективных данных о движении судов. Так, в работе [14] был предложен способ выделения паттернов движения на морской акватории, основанный на кластеризации. Акватория разбивалась на небольшие участки, в которых методом субтрактивной кластеризации определялись характерные значения курсов и скоростей судов. Полученную информацию предлагалось использовать для поддержки принятия решений судоводителями (на борту) и операторами береговых систем управления движением. Она позволяет выявлять суда «нарушающие» сложившуюся схему движения и обеспечивать таким образом движение судов с учетом накладываемых ею ограничений.

В работе [15] решается непосредственно задача планирования маршрута на акватории с интенсивным движением. Для этого результаты кластеризации – выявленные характерные значения курсов судов – используются для построения графа возможных маршрутов. Вес ребер графа зависит от «желательности» того или иного курса судна для каждой точки акватории с учетом выявленных кластеров. Это позволяет

формировать маршруты судов, максимально учитывающие сложившуюся практику судовождения.

В работе [16] граф возможных маршрутов предлагается строить путем выборки траекторий отдельных судов, находившихся на акватории ранее. Маршруты формируются из геометрических представлений как множество пересекающихся ломаных. Это позволяет уйти от проблемы выбора параметров разбиения акватории, которая возникала при использовании кластеризации в работах [14, 15] и требует гораздо меньшего объема исходных ретроспективных данных. Вместе с тем, предложенный в [16] метод обладал существенным недостатком: все возможные маршруты судов были равнозначны, не учитывалась «популярность» того или иного маршрута, является ли он изолированным или в его окрестности есть другие похожие маршруты. В некоторых случаях это приводило к планированию маршрутов хоть и корректных (реализуемых), но не самых характерных для выбранной акватории.

Настоящая работа представляет собой дальнейшее развитие методов решения задачи планирования маршрутов судов на акваториях с интенсивным движением. Как и в работе [16], предлагаемый метод основан на формировании графа возможных маршрутов из множества пересекающихся ломаных, каждая из которых представляет собой реализованный ранее маршрут. При этом каждому ребру графа приписывается мера его «желательности», характеризующая близость к нему других ребер. Кратчайший путь на взвешенном графе строится с учетом не только геометрической длины ребер, но и меры их «желательности». Найденный таким образом маршрут будет пролегать среди наиболее часто реализуемых на акватории траекторий движения.

### Материалы и методы

Данные о движении судов, получаемые с помощью средств Автоматической идентификационной системы включают в себя довольно широкий набор параметров: координаты, курсы и скорости судов, их названия и регистрационные номера, геометрические размеры, информацию о маневрировании, пункт назначения и целый ряд других. Характерный период обновления этих данных при непосредственной работе инструментов АИС составляет от одной до нескольких секунд, а на общедоступных информационных сервисах (типа [marinetraffic.com](http://marinetraffic.com)) – от одной до нескольких десятков минут [17].

Пусть для каждого «ретроспективного» судна имеется множество записей вида  $\{LAT_i, LON_i, SPEED_i, COURSE_i, TIME_i\}$ , где  $i$  – номер записи,  $LAT_i$  и  $LON_i$  – географические широта и долгота,  $SPEED_i$  и  $COURSE_i$  – скорость и курс,  $TIME_i$  – момент времени, к которому относится запись. Зададим систему координат, где ось абсцисс соответствует долготе, а ось ординат – широте. При таких исходных данных пройденный судном путь может быть задан ломаной линией с вершинами  $\{LAT_i, LON_i\}$ . Считая, что таким образом строятся пути для каждого из  $N$  судов, по которым имеются ретроспективные данные, будем иметь  $N$  ломаных  $\{LAT_i, LON_i\}_j, j = \overline{1, N}$ .

Вершины указанных ломаных будем считать вершинами графа возможных маршрутов, а их отрезки – ребрами такого графа. Точки пересечения отрезков ломаных также включим в граф, дополнив его соответствующими ребрами так, чтобы обеспечить связность (Рисунок 1).

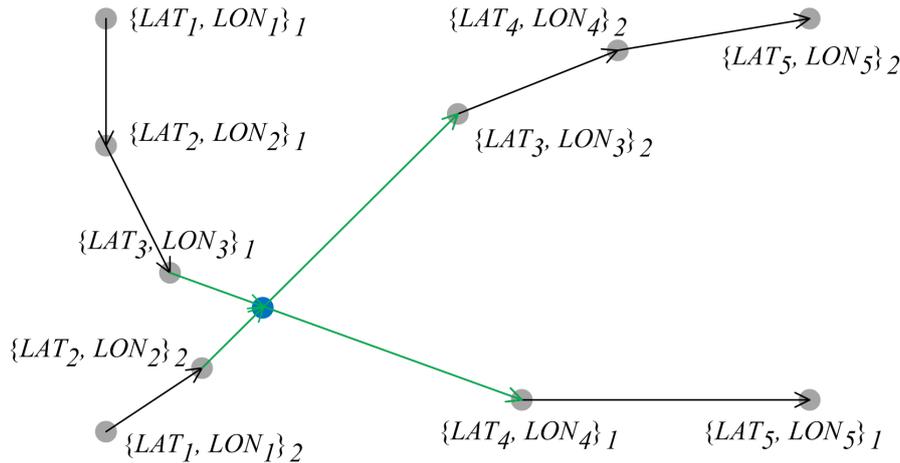


Рисунок 1 – Построение графа возможных маршрутов судна из пересекающихся ломаных  
Figure 1 – Construction of possible ship route graph from intersecting broken lines

При построении рассматриваемым способом граф возможных маршрутов будет ориентированным.

На Рисунке 1 показано, как граф возможных маршрутов дополняется новыми вершинами и ребрами. Серыми точками и черными линиями показаны пути двух судов, это вершины и ребра графа, получаемые из исходных ретроспективных данных. Синяя точка – дополнительная вершина, зеленые линии – дополнительные ребра.

Примем, что исходная длина ребра равна длине соответствующей дуги Большого круга. Будем определять вес ребер графа таким образом, чтобы наряду с длиной дополнительно учесть «популярность» того или иного пути, реализованного в ретроспективных данных о движении, то есть количество судов, проследовавших похожим образом. Для этого обратимся к природной аналогии – электромагнитному явлению взаимодействия проводников с током, описываемому законом Ампера.

Пусть  $dl_1$  и  $dl_2$  – бесконечно малые отрезки (векторы),  $I_1$  и  $I_2$  – сила тока в этих отрезках. Тогда сила, действующая на отрезок  $dl_1$  со стороны магнитного поля, создаваемого отрезком  $dl_2$ , описывается формулой (закон Ампера в дифференциальной форме):

$$d^2F_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \frac{dl_1 \times [dl_2 \times (r_1 - r_2)]}{|r_1 - r_2|^3}. \quad (1)$$

Здесь  $r_1$  и  $r_2$  – радиус-векторы отрезков  $dl_1$  и  $dl_2$ ,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\times$  – символ векторного произведения. Эта формула учитывает как расстояние между отрезками, так и их взаимное расположение. Сильнее всего взаимодействуют «параллельно» расположенные отрезки. Если токи в отрезках однонаправлены – они будут притягиваться, если направлены противоположно – отталкиваться.

Адаптируем закон Ампера (1) к рассматриваемой задаче. Пусть «влияние» на отрезок  $dl_1$  со стороны отрезка  $dl_2$  задается формулой (Рисунок 2):

$$d^2P_{12} = I_1 I_2 (dl_1 \cdot dl_2) \left| \frac{(r_1 - r_2)}{|r_1 - r_2|^3} \times \frac{dl_1}{|dl_1|} \right|. \quad (2)$$

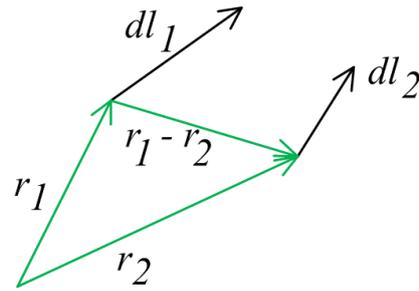


Рисунок 2 – Взаимодействие элементарных отрезков  
 Figure 2 – Interaction of elementary segments

Здесь  $I_1$  и  $I_2$  могут быть приняты равными 1, а могут быть величинами, характеризующими влияние отрезков друг на друга, выражая, например, приведенные скорости судов. Скалярное произведение  $dl_1 \cdot dl_2$  оценивает коллинеарность отрезков, одновременно соотнося ее с их длиной: чем отрезки длиннее, тем сильнее их взаимное влияние. Векторное произведение в формуле описывает взаимное расположение отрезков, одновременно соотнося его с квадратом расстояния между ними. Имея в виду, что отрезки  $dl_1$ ,  $dl_2$  и их радиус-векторы расположены в одной плоскости (абсцисс и ординат), вектор, формируемый векторным произведением, будет параллелен оси аппликат. Таким образом, скалярная величина  $d^2P_{12}$  – это степень взаимодействия отрезков  $dl_1$  и  $dl_2$ , сочетающая их коллинеарность, взаимное расположение и расстояние. Положительное значение величины  $d^2P_{12}$ , определяемое скалярным произведением  $dl_1 \cdot dl_2$  и знаками  $I_1$  и  $I_2$  будет соответствовать «позитивному» взаимному влиянию отрезков  $dl_1$  и  $dl_2$ , отрицательное – их «нежелательному» влиянию.

При переходе от бесконечно малых к реальным отрезкам  $l_1$  и  $l_2$  необходимо проинтегрировать формулу для  $d^2P_{12}$  (интегрирование по кривым  $l_1$  и  $l_2$  первого рода) получив интегральное значение  $P_{12}$ . Окончательно, общая «популярность» выбранного отрезка некоторой ломаной будет определяться суммой «влияний» всех отрезков других ломаных. Чем больше судов прошло в окрестности отрезка с близким курсом, тем больше будет эта сумма (Рисунок 3).

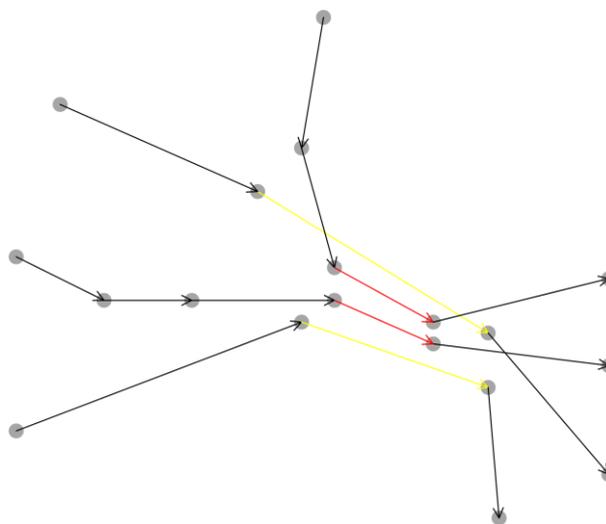


Рисунок 3 – Иллюстрация оценки «популярности» отрезков ломаных  
 Figure 3 – Illustration of polyline segment “popularity”

При расчетах на реальных данных целесообразно нормировать величину расстояния между отрезками  $|r_1 - r_2|$ , введя пороговое значение  $D$ , при котором влияние отрезков друг на друга считается одинаковым. Если расстояние  $|r_1 - r_2|$ , меньше  $D$ , оно считается равным  $D$ .

На Рисунке 3 дается иллюстрация предлагаемого способа расчета «популярности» отрезков ломаных на основе адаптированного закона Ампера (2). В примере имеется четыре ломаных, соответствующих маршрутам четырех судов. Степень популярности отрезков показана цветом. Черные отрезки – такие, в окрестности которых нет других отрезков с похожим направлением. Желтые отрезки – такие, рядом с которыми есть другие с похожим направлением. Красные отрезки – самые «популярные» – лежат в центре пучка других отрезков.

Окончательно вес ребер графа возможных маршрутов вычисляется следующим образом:

$$w = \frac{l}{\frac{P}{T} + 1}, \text{ если } P \geq 0,$$

$$w = l(1 - P), \text{ если } P < 0,$$

где  $l$  – длина ребра,  $P$  – «популярность» отрезка. Так, если значение  $P$  близко к 0, то вес ребер графа будет близок к их длине. Если для какого-то ребра  $P$  отрицательно, значит ребро лежит близко к ребрам с противоположным направлением движения и его вес увеличивается. Если  $P$  – положительно, значит ребро расположено среди других с похожим направлением движения (как красные ребра на Рисунке 3) и его вес уменьшается.

Оценим характерный размер графа возможных маршрутов и сложность алгоритма оценки популярности его ребер. Положим, что линейные размеры типичных акваторий, для которых актуальна рассматриваемая задача, составляют десятки километров. Маршрут судна через такую акваторию может занимать несколько часов. Если период обновления данных по наблюдаемым судам будет равен одной минуте, а время движения составит, например, 10 часов, то для каждого судна будем иметь ломаную, состоящую из порядка 600 точек и отрезков. Число судов, находившихся в течение этого времени на акватории, может исчисляться от десятков до нескольких тысяч, если взять число судов равным 1000, это даст оценку в 600 000 точек и отрезков. Эти ломаные могут иметь множество пересечений, что увеличит число вершин и ребер графа возможных маршрутов еще в 2-4 раза, будем иметь около  $2 \times 10^6$  вершин и ребер. Сложность поиска пересечений отрезков и оценки популярности отрезков – квадратичная. Таким образом, построение графа возможных маршрутов такого размера представляет собой довольно емкую вычислительную задачу. Вместе с тем ее можно решать поэтапно, по мере поступления новых данных, она не требует решения в оперативном режиме, граф можно готовить заранее, что делает его построение вполне реализуемым на практике даже с использованием стандартных ЭВМ общего назначения. Формируемые на основе такого графа кратчайшие маршруты по числу ребер будут соизмеримы с числом отрезков у исходных ломаных (несколько сотен). Как показали приведенные ниже расчеты, для их поиска достаточно известных детерминированных алгоритмов поиска кратчайших маршрутов на графах.

## Результаты

Для формирования базы ретроспективных данных о движении судов была создана специальная программная система, позволяющая собирать и хранить данные с ресурса

*marinetraffic.com* (или подобных ему) [18, 19]. На этих данных и проводились расчеты, результаты которых представлены ниже.

На Рисунке 4 показано планирование маршрутов в Сангарском проливе, для расчетов были взяты данные о движении судов в течение одних суток.

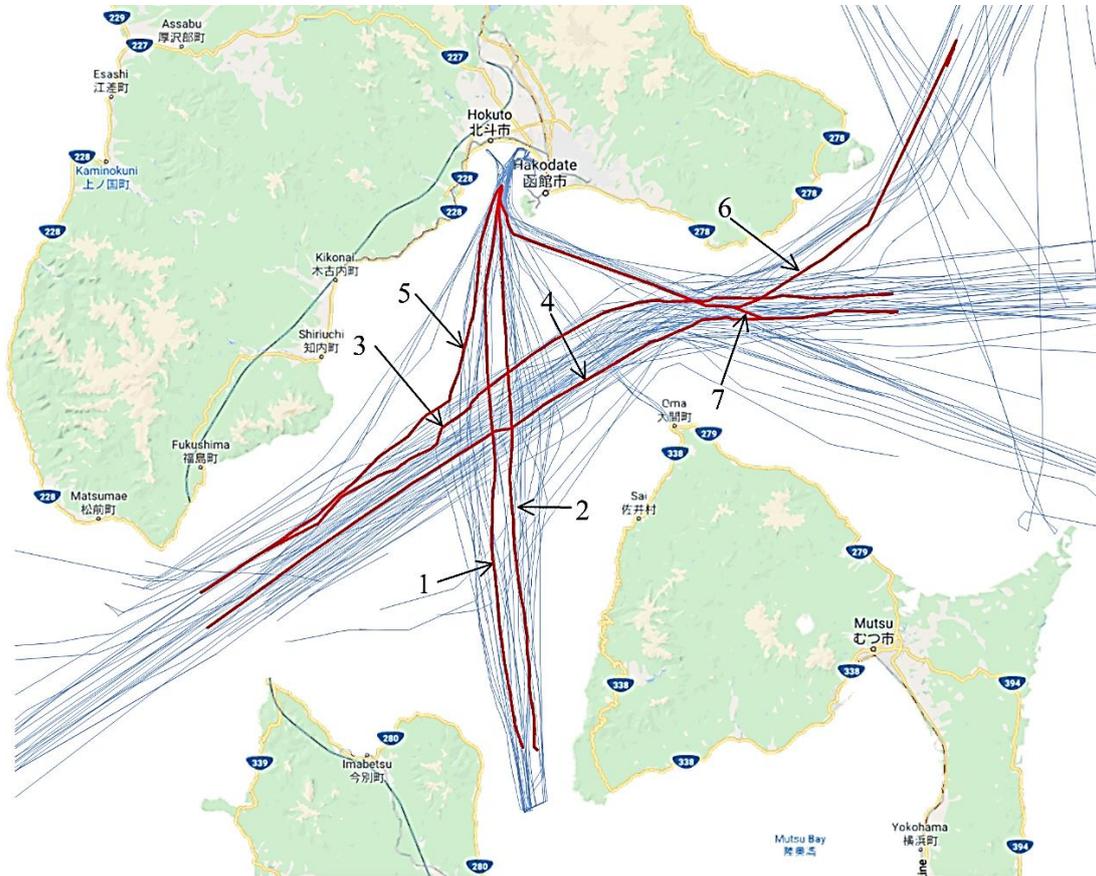


Рисунок 4 – Планирование маршрутов в Сангарском проливе  
Figure 4 – Route planning in the Tsugaru Strait

Граф возможных маршрутов строился из 130 ломаных, состоявших из около 80 тыс. вершин. Окончательно, с учетом пересечений, граф включал в себя около 200 тыс. вершин. Светло-синие линии – это траектории, использованные для построения графа. Красным показаны следующие рассчитанные маршруты:

1. Порт Хакодате – залив Муцу;
2. Залив Муцу – порт Хакодате;
3. Тихий океан – Японское море;
4. Японское море – Тихий океан;
5. Порт Хакодате – Японское море;
6. Порт Хакодате – Тихий океан (в направлении на северо-восток);
7. Порт Хакодате – Тихий океан (в направлении на восток).

На Рисунке 5 показан пример планирования маршрутов в акватории, прилегающей к порту Владивосток. Были взяты данные о движении судов в течение одних суток, граф возможных маршрутов строился из 170 ломаных, с учетом пересечений включал в себя около 300 тыс. вершин.

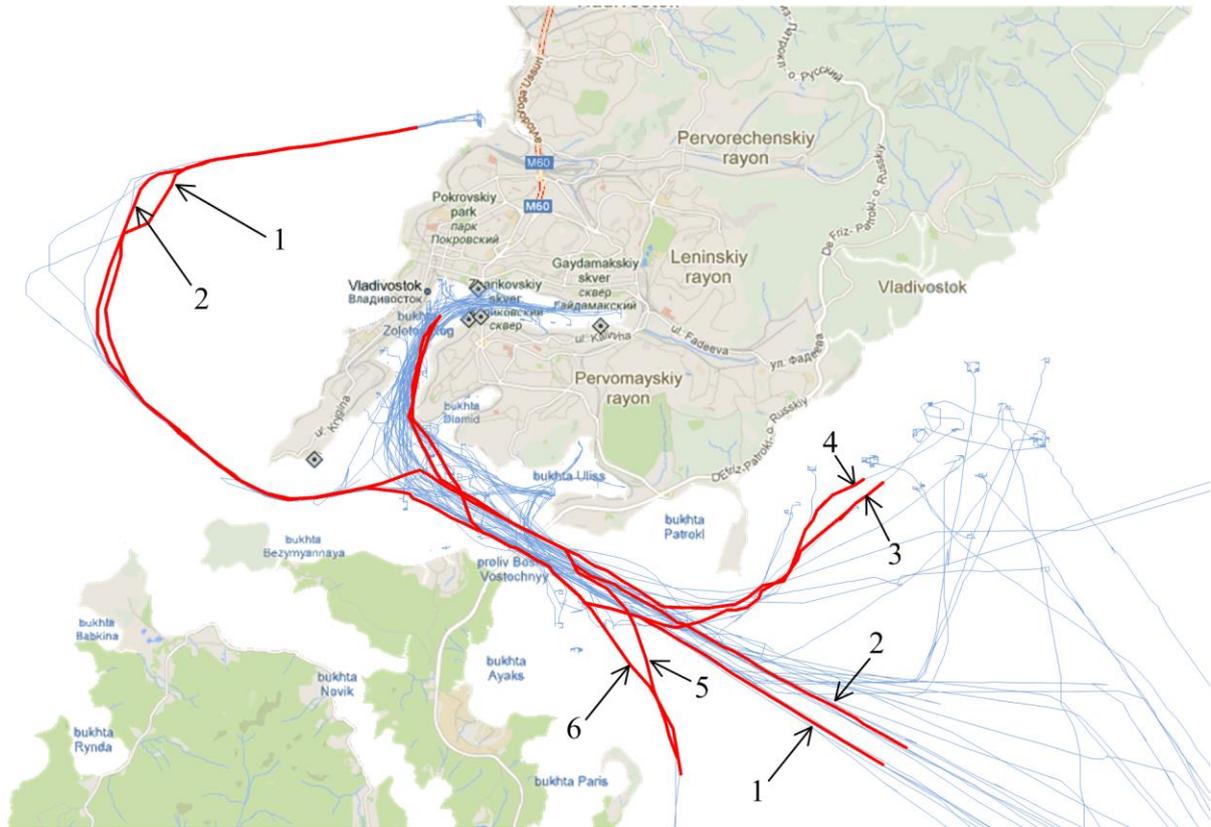


Рисунок 5 – Планирование маршрутов в районе порта Владивосток  
Figure 5 – Route planning near The Seaport of Vladivostok

Красным показаны следующие рассчитанные маршруты:

1. Первая речка – Уссурийский залив;
2. Уссурийский залив – Первая речка;
3. Уссурийский залив (стоянка) – бухта Золотой Рог;
4. Бухта Золотой Рог – Уссурийский залив (стоянка);
5. Уссурийский залив (вокруг о. Русский) – бухта Золотой Рог;
6. Бухта Золотой Рог – Уссурийский залив (вокруг о. Русский).

Приведенные на Рисунках 4 и 5 результаты показывают, что предложенный метод позволяет решать задачу планирования маршрута так, чтобы суда двигались по наиболее типичным для выбранной акватории траекториям. Так, маршруты 1 и 2, 3 и 4 на Рисунке 4 принимают правильную сторону движения (правостороннее движение). Маршруты 4 и 7 (Рисунок 4) на завершающем участке и маршруты 6 и 7 (Рисунок 4) на начальном участке – совпадают, то есть алгоритм выбирает один и тот же маршрут как самый подходящий для движения на том или ином участке акватории. Изломанность, которая наблюдается у некоторых участков маршрутов на Рисунках 4 и 5 обусловлена небольшим набором исходных данных (всего за сутки). Например, юго-восточный участок маршрутов 5 и 6 (Рисунок 5) строился всего по одной траектории, западный участок маршрутов 1 и 2 – по двум-трем возможным траекториям. При увеличении выборки исходных данных вычисленные маршруты будут сглаживаться.

### Обсуждение

Предложенный способ оценки «популярности» маршрута на основе адаптированного закона Ампера (2) показал свою эффективность в рассматриваемой задаче планирования маршрутов судов. Кроме рассмотренного случая, когда граф

возможных маршрутов строится по реализованным траекториям, он вполне может быть применен и для случая традиционного графа с регулярной сеткой вершин и ребер. В этом случае исходная акватория разбивается на участки и множество вершин графа задается с заданной дискретностью на тех участках, где допускается движение судов. Множество ребер графа формируется соединением вершин по принципу «каждая с каждой», исключая те ребра, которые проходят по недопустимым для движения участкам. Для уменьшения числа ребер их максимально возможная длина ограничивается. Получается схема, показанная на Рисунке 6, когда вокруг каждой вершины формируется область связности размера 3×3 (Рисунок 6, слева), 5×5 (Рисунок 6, справа) и т. п. Популярность ребра графа определяется результатами их соотнесения с отрезками ломаных из ретроспективных данных о движении по формуле (2).

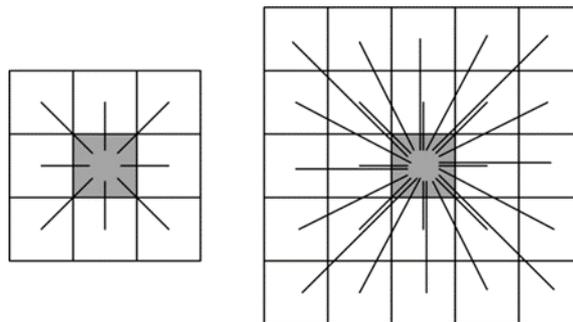


Рисунок 6 – Формирование множества ребер графа с регулярной сеткой вершин  
 Figure 6 – Formation of a graph edges set with a regular grid of vertices

Существенным недостатком графа с регулярной сеткой вершин является дискретность курсов. С ростом размеров области связности вокруг вершин проявление дискретности уменьшается. Описанное построение графа возможных маршрутов на основе регулярной сетки может быть оправдано при небольшом объеме ретроспективных данных (например, на акваториях с низкой интенсивностью движения), когда граф на их основе не будет содержать актуального множества маршрутов.

Интерпретация предложенной «популярности» маршрута может быть расширена и использована также в качестве метрики плотности трафика на том или ином участке акватории. Плотность трафика используется на практике для сводного представления характера движения, иллюстрации фарватеров, районов промысла, мест стоянок судов и т. п. Традиционные подходы к оценке плотности трафика связаны с дискретизацией акватории, ее разбиением на участки и определением количества судов, прошедших через тот или иной участок за единицу времени [20]. Размеры участков накладывают в этом случае ограничения на масштаб возможного изображения плотности трафика (это хорошо видно, например, по характеру работы такой функциональности, реализованной на сервисе *marinetraffic.com*). Если изображать трафик, «раскрашивая» отрезки ломаных ретроспективных данных о движении, как в примере на Рисунке 3, это существенно расширит границы масштаба формируемого изображения плотности трафика по сравнению с существующими подходами.

Задаваемая формулой (2) «популярность» отрезка как мера его близости к другим, является аналогией понятия потенциала объекта в известных методах распознавания образов и машинного обучения, основанных на потенциальных функциях. Так, в методах горной и субтрактивной кластеризации [21, 22] потенциал объекта характеризует возможность формирования кластера в его окрестности и определяется как сумма «воздействий» на объект со стороны соседних объектов. В классическом методе

потенциальных функций [23] потенциал определяет близость двух точек и обычно задается как функция расстояния между ними. Потенциальная функция, как правило, такова, что она монотонно уменьшается с увеличением расстояния. Таким образом, формулу (2) можно считать функцией, задающей потенциал отрезка среди множества других отрезков.

Вообще, в последнее время можно отметить повышенный интерес исследовательской и инженерной среды к анализу данных трафика акваторий. Так, статья [24] является одной из первых больших работ, в которой изучались задачи судовождения, связанные с обработкой больших массивов ретроспективных данных о движении судов. В ней описаны особенности информации, предоставляемой Автоматической идентификационной системой, ряд связанных с особенностью этой технологии ограничений. Делается вывод о возможности использования методов кластеризации для выявления особенностей судопотоков, аномально движущихся судов, планирования маршрутов. Приводятся примеры расчетов на ряде интересных акваторий. Отмечается, что для эффективного решения прикладных задач методами кластеризации нужно правильно подбирать их параметры, они будут неодинаковы для различных акваторий и должны отражать особенности их трафика. Это требует проведения для каждой акватории отдельного исследования.

В ряде работ обсуждается метод кластеризации данных о движении, когда объектами кластеризации выступают ломаные, представляющие собой траектории судов, прошедших по акватории (как в настоящей работе). Так, в работе [25] для этого используется метод кластеризации *k-medoids*, а в работе [11] – метод *DBSCAN*. Это позволяет выявлять аномально движущиеся объекты, которые нарушают сложившуюся на акватории схему движения, а также планировать маршруты на основе выделенных паттернов движения. Указанные алгоритмы кластеризации также требуют подбора их параметров, отдельно для каждой акватории и источника данных.

Предложенный в настоящей работе метод планирования маршрутов хотя и связан с кластеризацией, но не реализует таких алгоритмов явно. Он не связан с дискретизацией исходных данных, не требует какого-либо дополнительного разбиения акватории, поэтому лишен соответствующих недостатков уже известных методов.

## Заключение

Работа посвящена задаче планирования маршрутов морских судов, проходящих по акватории с интенсивным движением. Предложенный метод решения задачи основан на использовании ретроспективной информации о трафике акватории таким образом, чтобы движение судна соответствовало сложившейся практике и ограничениям.

Суть предлагаемого подхода состоит в построении графа возможных маршрутов из множества пересекающихся ломаных, каждая из которых представляет собой траекторию судна, реализованную ранее. Главным отличием подхода от существующих является учет «популярности» того или иного участка маршрута путем оценки количества реализованных ранее «похожих» маршрутов. В качестве модели такой «популярности» участка маршрута предлагается адаптированный вариант закона Ампера. Фактически, таким образом происходит неявная кластеризация данных о движении, не требующая разбиения акватории на участки.

Источником ретроспективных данных о трафике акватории могут служить сервисы Автоматической идентификационной системы. В частности, в настоящей статье расчеты проводились на данных, полученных с портала *marinetraffic.com*, для загрузки и сохранения которых была разработана специальная программная система. Дается оценка

характерных размеров графа возможных маршрутов, сложности алгоритма его построения.

В работе приведены примеры планирования маршрутов через Сангарский пролив и через акваторию, прилегающую к порту Владивосток. Результаты моделирования подтверждают применимость предложенных идей.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Франк М.О., Овчинников К.Д., Рыжов В.А. Обзор российского и зарубежного опыта создания безэкипажных катеров. *Морские интеллектуальные технологии*. 2022;57(3-1):22–28. DOI: 10.37220/МІТ.2022.57.3.002.
2. Коренев А.С., Хабаров С.П., Шпекторов А.Г. Формирование траекторий движения безэкипажного судна. *Морские интеллектуальные технологии*. 2021;54(4-1):158–165. DOI: 10.37220/МІТ.2021.54.4.047.
3. Дыда А.А., Пушкарев И.И., Чумакова К.Н. Алгоритм обхода статических препятствий для безэкипажного судна. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2021;13(3):307–315. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-307-315.
4. Ардельянов Н.П. Промежуточные результаты концепции е-навигации. *Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова*. 2022;39(2):8–11.
5. Ривкин Б.С. Е-навигация. Прошло 5 лет. *Гироскопия и навигация*. 2020;28(1):101–120. DOI: 10.17285/0869-7035.0026.
6. Писмаркин Д.Д. Курсовая устойчивость и оптимизация судового пути судна при внешних возмущающих воздействиях в критериях концепции развития е-навигации. *Транспортное дело России*. 2020;(2):152–156.
7. Tsolakakis A., Benders D., de Groot O., Negenborn R.R., Reppa V., Ferranti L. COLREGs-aware Trajectory Optimization for Autonomous Surface Vessels. *IFAC-PapersOnLine*. 2022; 55(31):269–274. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.10.441.
8. 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.
9. Першина Л.А., Астреина Л.Б. Выбор маршрута судна на основе погодных условий. *Эксплуатация морского транспорта*. 2019;(2):30–38.
10. 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.
11. Zhao L., Shi G. Maritime anomaly detection using density-based clustering and recurrent neural network. *Journal of Navigation*. 2019;72(4):894–916. DOI: 10.1017/S0373463319000031.
12. Таратынов В.В. Целесообразность разделения морских путей. *Морской флот*. 1969;(9):19–20.
13. Лентарёв А.А. *Основы теории управления движением судов*. Владивосток: Морской государственный университет; 2018. 181 с.
14. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Иваненко Ю.С. Поддержка принятия решений при обеспечении безопасности движения судов на основе кластеризации траекторий. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2020;12(3):436–449. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-436-449.

15. Гриняк В.М., Шуленина А.В. Кластеризация данных траекторий морских судов для планирования маршрутов через акватории с интенсивным движением. *Информационные технологии*. 2021;27(11):607–615. DOI: 10.17587/it.27.607-615.
16. 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):25–26. DOI: 10.26102/2310-6018/2022.38.3.014.
17. Onyango S.O., Owiredo S.O., Kim K.I., Yoo S.L. A Quasi-Intelligent Maritime Route Extraction from AIS Data. *Sensors*. 2022;22(22):8639. DOI: 10.3390/s22228639.
18. Гриняк В.М., Шурыгин А.В. Программа сбора траекторных данных о движении судов из открытых интернет источников. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018618729 Россия. Опубл. 19.07.2018.
19. Головченко Б.С., Гриняк В.М. Информационная система сбора данных о движении судов на морской акватории. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2014;(2):156–162.
20. Гриняк В.М., Иваненко Ю.С., Люлько В.И., Шуленина А.В., Щурыгин А.В. Цифровое представление и комплексная оценка навигационной безопасности движения на морских акваториях. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(1). DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.003.
21. Yager R., Filev D. *Essentials of fuzzy modeling and control*. New York: John Wiley & Sons. 1994. 388 p.
22. Yager R.R., Filev D.P. Generation of Fuzzy Rules by Mountain Clustering. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 1994;2(3):209–219. DOI: 10.3233/IFS-1994-2301.
23. Айзерман М.А., Браверман Э.М., Розоноэр Л.И. *Метод потенциальных функций в теории обучения машин*. М.: Наука; 1970. 384 с.
24. 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. DOI: 10.3390/e15062218.
25. 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. DOI: 10.1017/S0373463316000850.

## REFERENCES

1. Frank M.O., Ovchinnikov K.D., Ryzhov V.A. Review of Russian and foreign experience of marine unmanned surface vehicles development. *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii = Marine intellectual technologies*. 2022;57(3-1):22–28. DOI: 10.37220/MIT.2022.57.3.002. (In Russ.).
2. Korenev A.S., Khabarov S.P., Shpectorov A.G. A route calculation for unmanned vessel. *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii = Marine intellectual technologies*. 2021;54(4–1):158–165. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.047. (In Russ.).
3. Dyda A.A., Pushkarev I.I., Chumakova K.N. Static obstacles avoidance algorithm for unmanned ship. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2021;13(3):307–315. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-307-315. (In Russ.).
4. Ardelyanov N.P. Intermediate results of the e-navigation concept. *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova*. 2022;39(2):8–11. (In Russ.).
5. Rivkin B.S. e-Navigation: Five Years Later. *Giroskopiya i navigatsiya = Gyroscopy and Navigation*. 2020;28(1):101–120. DOI: 10.17285/0869-7035.0026. (In Russ.).

6. Pismarkin D.D. Course stability and optimization of a ship's way of a vessel at external disturbing influences in criteria of the concept of development of e- Navigation. *Transport business of Russia*. 2020;(2):152–156. (In Russ.).
7. Tsolakis A., Benders D., de Groot O., Negenborn R.R., Reppa V., Ferranti L. COLREGs-aware Trajectory Optimization for Autonomous Surface Vessels. *IFAC-PapersOnLine*. 2022; 55(31):269–274. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.10.441.
8. 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.
9. Pershina L.A., Astreina L.S. Ship routing based on weather conditions. *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. 2019;(2):30–38. (In Russ.).
10. Sotnikova M.V. Algorithms of marine ships routing taking into account weather forecast, Vestnik of Saint Petersburg university applied mathematics. Computer science. Control processes. 2009;(2):181–196. (In Russ.).
11. Zhao L., Shi G. Maritime anomaly detection using density-based clustering and recurrent neural network. *Journal of Navigation*. 2019;72(4):894–916. DOI: 10.1017/S0373463319000031.
12. Taratynov V.V. Celesoobraznost' razdeleniya morskikh putej. *Morskoj flot*. 1969;(9):19–20. (In Russ.).
13. Lentaryov A.A. *Osnovy teorii upravleniya dvizheniem sudov*. Vladivostok: Morskoj gosudarstvennyj universitet; 2018. 181 p. (In Russ.).
14. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S., Ivanenko Y.S. Decision support for marine traffic control based on route clustering. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2020;12(3):436–449. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-436-449. (In Russ.).
15. Grinyak V.M., Shulenina A.V. Marine traffic data clustering for ships route planning. *Informatsionnyye tekhnologii = Information Technologies*. 2021;27(11):607–615. DOI: 10.17587/it.27.607-615. (In Russ.).
16. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S. Ships route planning in heavy-traffic marine area based on historical data. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(3):25–26. DOI: 10.26102/2310-6018/2022.38.3.014. (In Russ.).
17. Onyango S.O., Owiredu S.O., Kim K.I., Yoo S.L. A Quasi-Intelligent Maritime Route Extraction from AIS Data. *Sensors*. 2022;22(22):8639. DOI: 10.3390/s22228639.
18. Grinyak V.M., Shurygin A.V. Programma sbora traektornykh dannykh o dvizhenii sudov iz otkrytykh internet istocnikov. Patent RU 2018618729. 19.07.2018. (In Russ.).
19. Golovchenko B.S., Grinyak V.M. Information system for vessels traffic data capture. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2014;(2):156–162. (In Russ.).
20. 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 = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(1). DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.003. (In Russ.).
21. Yager R., Filev D. *Essentials of fuzzy modeling and control*. New York: John Wiley & Sons; 1994. 388 p.
22. Yager R.R., Filev D.P. Generation of Fuzzy Rules by Mountain Clustering. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 1994;2(3):209–219. DOI: 10.3233/IFS-1994-2301.
23. Aizerman M.A., Braverman E.M., Rozonoer L.I. *Extrapolative problems in automatic control and the method of potential functions*. American Mathematical Society

- Translations. 1970;(2):3. (In Russ.).
24. 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. DOI: 10.3390/e15062218.
25. 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. DOI: 10.1017/S0373463316000850.

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

**Гриняк Виктор Михайлович**, доктор технических наук, доцент, кафедра Информационных технологий и систем, Владивостокский государственный университет, 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)  
Scopus Author ID: 7801667666

**Victor Mikhailovich Grinyak**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Information Technologies and Systems Department, Vladivostok State University, Vladivostok, the Russian Federation.

**Прудникова Лариса Ивановна**, кандидат физико-математических наук, доцент, департамент Программной инженерии и искусственного интеллекта, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация.  
*e-mail*: [prudnikova.li@dvfu.ru](mailto:prudnikova.li@dvfu.ru)

**Larisa Ivanovna Prudnikova**, Candidate of Mathematical Sciences, Software Engineering and Artificial Intelligence Department, Far Eastern Federal University, Vladivostok, the Russian Federation.

**Артемьев Андрей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, кафедра судоходства, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация.  
*e-mail*: [artemyev@msun.ru](mailto:artemyev@msun.ru)

**Andrey Vladimirovich Artemiev**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Navigation, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, the Russian Federation.

**Левченко Дмитрий Максимович**, аспирант, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Российская Федерация.  
*e-mail*: [kadiabasta@gmail.com](mailto:kadiabasta@gmail.com)

**Dmitry Maksimovich Levchenko**, Postgraduate Student, Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, Vladivostok, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 07.04.2023; одобрена после рецензирования 07.05.2023; принята к публикации 01.06.2023.*

*The article was submitted 07.04.2023; approved after reviewing 07.05.2023; accepted for publication 01.06.2023.*