

УДК 004.8

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.33.2.018](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.33.2.018)

Планирование маршрутов судов через акватории с интенсивным движением

В.М. Гриняк^{1,2,3}, А.В. Шуленина², Л.И. Прудникова², А.С. Девятисильный³

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса», Владивосток, Российская Федерация

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Российская Федерация

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук», Владивосток, Российская Федерация

Резюме: Статья посвящена проблеме обеспечения безопасности движения судов на морских акваториях. Рассматривается задача планирования маршрута перехода судна через акватории с интенсивным движением, которая представляется актуальной, в том числе в свете перспективного развития беспилотных морских транспортных средств. При движении через акватории с установленными путями планирование маршрута перехода судна следует осуществлять с учетом заданных ограничений. Возможным путем идентификации этих ограничений является выделение паттернов движения конкретной морской акватории из ретроспективной информации о ее трафике. Модельные представления такой задачи могут быть сформулированы на основе идеи о кластеризации параметров движения судов. В основу модели задачи планирования маршрута положен поиск кратчайшего пути на взвешенном графе. Предлагается несколько способов построения такого графа: регулярная сетка вершин и ребер, слоистая сетка вершин и ребер, случайная сетка вершин и ребер, вершины и ребра на основе ретроспективных данных. Вес ребер предлагается задавать как функцию «желательности» того или иного курса судна для каждой точки акватории с учетом выявленных паттернов движения. Для этого акватория разбивается на участки, и для каждого из них выполняется кластеризация курсов и скоростей. В работе обсуждаются возможные методы кластеризации, делается выбор в пользу субтрактивной кластеризации, не требующей предварительного задания количества кластеров. Источником данных о трафике акватории могут служить сервисы Автоматической идентификационной системы. В работе показана возможность использования данных АИС, доступных на специализированных интернет-ресурсах. Несмотря на «разреженность» этих данных, они хорошо отражают сводные особенности трафика акваторий. Приведены примеры планирования маршрутов перехода через Сангарский пролив и Токийский залив.

Ключевые слова: безопасность судоходства, интенсивность движения, траектория движения, кластеризация, трафик акватории, Автоматическая идентификационная система.

Для цитирования: 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). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=980> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.018

Ships route planning on heavy-traffic marine area

V.M. Grinyak^{1,2,3}, A.V. Shulenina², L.I. Prudnikova², A.S. Devyatisilnyi³

¹Federal State State-financed Educational Institution of Higher Education «Vladivostok State University of Economics and Service»,

Vladivostok, Russian Federation

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
«Far Eastern Federal University», Vladivostok, Russian Federation

³Federal State State-financed Institution of Science «Institute of Automation and Control
Processes Far Eastern Branch Russian Academy of Science»,
Vladivostok, Russian Federation

Abstract: This work is about navigation safety of marine traffic at sea areas. The paper considers the problem of planning a route for a vessel to cross water areas with heavy traffic. It should be borne in mind that the trajectory of the vessel should be consistent with established navigational practices and collective navigation experience. Isolation of established patterns of movement of a specific sea area from retrospective information about its traffic by clustering the parameters of vessel movement is a promising way to identify such an experience. The task is considered relevant due to the promising development of unmanned marine vehicles. Ship's passage routes planning passage should be carried out considering the specified restrictions when moving through the water areas with established routes. Isolation of patterns of movement of a specific marine area from retrospective information about its traffic is a possible way of identifying these restrictions. Model representations of such a problem can be formulated based on the idea of clustering the parameters of ship traffic. The model of the route planning problem is based on finding the shortest path on a weighted graph. There are several ways to construct such a graph: a regular mesh of vertices and edges, a layered mesh of vertices and edges, a random mesh of vertices and edges, vertices and edges based on historical data. The weight of the ribs is proposed to be set as a function of the “desirability” of a particular course of the vessel for each point of the water area, considering the identified movement patterns. The water area is divided into sections and for each of them clustering of rates and velocities is performed. Possible clustering methods are discussed in the paper, and a choice is made in favor of subtractive clustering, which does not require preliminary specification of the number of clusters. Services of the Automatic Identification System can serve as a source of data on water area traffic. The paper shows the possibility of using AIS data available on specialized Internet resources. These data reflect well the summary features of the water area traffic despite their “sparseness”. The historical AIS data of sea traffic at Tokyo Bay and Tsugaru Straight are used for identifying traffic schema and ship routes planning with the model designed under presented research.

Keywords: marine safety, traffic intensity, ship trajectory, ship traffic, clustering, traffic area, Automatic identification system.

For citation: Grinyak V.M, Shulenina A.V., Prudnikova L.I., Devyatisilnyi A.S. Ships route planning on heavy-traffic marine area. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(2). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=980> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.018 (In Russ).

Введение

Развитие методов и инструментов сбора, хранения и обработки больших массивов данных, сервисов Автоматической идентификационной системы (АИС), технологий е-навигации дало возможность использования новых методов для решения классических задач судовождения, постановки и исследования новых задач. Одной из таких новых задач является оценка характерных паттернов движения морской акватории, методы решения которой основаны на идеях кластеризации [1].

Информация о характерных параметрах движения может использоваться, например, при диспетчеризации трафика в заданном районе [2]. Другим перспективным приложением информации о характерных параметрах движения является планирование маршрута перехода судов через акватории с интенсивным движением. Суть проблемы в том, что особенности трафика вдоль предполагаемого маршрута судна оказывают

существенное влияние на выбор маршрута из множества возможных. Так, для акваторий с интенсивным движением часто вводится система установления путей движения судов, представляющая собой совокупность ограничений, обусловленных схемой движения судов («правилами движения»), определённой для конкретной акватории [3]. Указанная схема движения может быть принята как директивно, так и неявно (неформально): как квинтэссенция коллективного опыта судоходства в конкретном районе. При движении судна через такие районы планирование маршрута перехода необходимо осуществлять с учётом накладываемых ограничений.

Классическая задача планирования маршрута перехода представляет собой оптимизационную задачу, целью которой является плавание по самому короткому из возможных путей, за самое короткое время, с наименьшим расходом топлива и т.п. [4, 5]. В основу математической модели рассматриваемого варианта задачи планирования маршрута с учетом ограничений может быть положен поиск кратчайшего пути на взвешенном графе возможных маршрутов судна (такой подход является традиционным и хорошо себя зарекомендовавшим в рассматриваемом классе задач [6]). Вес ребер графа определяется «желательностью» того или иного курса судна для каждой точки акватории с учетом выявленных паттернов движения. В результате выбирается маршрут судна, являющийся наиболее «типичным» (а значит и безопасным) для выбранной акватории.

Рассматриваемая задача планирования маршрутов судов на основе информации о характерном движении представляется актуальной в том числе в свете перспективного развития беспилотного судоходства [7, 8].

Материалы и методы

Введем систему координат x, y , где ось x – географическая долгота, а ось y – географическая широта судна. Определим функцию желательности параметров движения судна $u(x, y, k, v)$ где k – курс, v – скорость, x, y – координаты судна. Желательность движения судна по выбранному маршруту q (некоторая кривая) может быть выражена как криволинейный интеграл первого рода

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

Решение оптимизационной задачи выбора маршрута q обеспечивает минимум функционала U :

$$q_* = \operatorname{argmin}_q U(q).$$

Хотя непосредственное решение последней задачи в принципе возможно, на практике к нему прибегают редко из-за высокой вычислительной сложности и (как правило) дискретности сетки аргументов функции $u(x, y, k, v)$. Популярным эвристическим упрощением задачи является ее модельная интерпретация поиском кратчайшего пути на взвешенном графе возможных маршрутов судна [6]. Рассмотрим подходы к построению такого графа.

Регулярная сетка вершин. Разбиение акватории на квадратные участки.

Разобьём акваторию на множество квадратных участков. На участках, в которых допустимо движение судна, выделим точки центров квадратов. Примем, что эти точки центров квадратов образуют множество вершин графа возможных маршрутов судна. Одна из них соответствует точке начала движения судна, другая – конечной точке маршрута. Множество ребер такого графа может задаваться соединением вершин по принципу «каждая с каждой», исключая те ребра, которые проходят по недопустимым для движения участкам. Также для уменьшения числа ребер графа следует ввести

дополнительное условие их максимальной длины. Недостатком такого графа является отсутствие ограничений на величину изменения курса судна в точках вершин, что может порождать неудобные или вообще нереализуемые маршруты.

Регулярная сетка вершин. Слоистое разбиение акватории.

Примем, что возможные маршруты судна лежат внутри прямоугольника. Прямоугольник строится так, что начало маршрута лежит в середине одной стороны прямоугольника, а конец маршрута – в середине противоположной стороны; прямоугольник заполняется вершинами графа так, чтобы формировалась правильная прямоугольная сетка. Вершины графа, которые лежащие на отрезках, перпендикулярных отрезку с вершинами в начальной и конечной точках маршрута, назовём слоями вершин. Примем, что при движении судна возможны переходы только между ближайшими слоями вершин. Рёбра, проходящие по недопустимым для движения участкам, исключаются. Также следует ограничить максимальную длину ребра. Такое представление графа учитывает судоводительскую специфику движения – неявно ограничивает величину изменения курса.

Случайная сетка вершин.

Возьмём за основу описанное выше разбиение акватории на квадратные участки. Пусть задана вероятность $P(x, y)$ того, что точка центра квадратов с координатами x, y есть вершина графа возможных маршрутов судна. Эта вероятность может быть одинаковой для всей акватории, а может быть различной для разных участков, например, увеличиваться в местах пересечения судопотоков и на участках характерного изменения курсов. При вырожденном случае $P(x, y) \equiv 1$ множество вершин совпадет с регулярной сеткой. Множество ребер графа задаётся так же, как для разбиения на квадратные участки. Проблемой случайной сетки вершин является трудность формального обоснования функции $P(x, y)$. Представляется, что она может быть задана лишь эвристическим способом. Кроме того, различные реализации графа возможных маршрутов при его случайном формировании могут приводить к существенно различным результатам поиска наилучшего маршрута. С другой стороны, после нескольких реализаций возможен последующий выбор «окончательного» наилучшего маршрута по какому-либо критерию.

Сетка вершин на основе ретроспективных данных.

Пусть имеются данные о движении судов на выбранной акватории за некоторый период времени в виде множества кортежей величин долготы, широты, скорости и курса судна. Зададим множество вершин графа возможных маршрутов на основе данных этого множества. При этом возможно два основных варианта: множество вершин графа формируется на основе полного множества данных о координатах судов или выбирается только часть множества, как, например, в описанном подходе со случайной сеткой вершин. Множество ребер графа может задаваться также, как при разбиении на квадратные участки, а может формироваться на основе данных о движении, если известны подмножества кортежей, относящихся к одной траектории. В последнем случае его следует дополнить и «не реализованными» вариантами ребер для обеспечения связности графа. Достоинством такого подхода является формирование возможных маршрутов судов, характерных для конкретной акватории. Недостатком является трудность формального обоснования интервала времени, за который берутся данные о движении. Представляется, что выбирать его следует эвристическим способом.

Рассмотрим подходы к заданию веса ребер графа возможных маршрутов. Примем, что в отсутствие данных о движении судов вес ребра равен длине дуги большого круга, соединяющей инцидентные ребру вершины. Если имеются данные о

движении судов, вводится весовой коэффициент каждого ребра $a \in [0, 1]$, задаваемый одним из следующих способов.

Учёт числа судов с близким курсом и скоростью.

Пусть имеются ретроспективные данные о движении судов (множество кортежей величин долготы, широты, скорости и курса) в некоторой окрестности выбранного ребра. Задаваясь соответствующим ребру курсом и предполагаемой скоростью, подсчитаем количество m «близких» (то есть лежащих в некотором интервале курсов и скоростей) векторов скорости судов в окрестности выбранного ребра. Весовой коэффициент ребра принимается равным $a = 1/m$. Таким образом, ребро будет тем легче (и, соответственно, предпочтительнее при планировании маршрута), чем больше судов ранее двигалось по соответствующей ему траектории. Возможен также подсчет m только на данных о курсе, без учета предполагаемой скорости судна. Недостатком такого подхода является учет всех судов, находившихся в окрестности ребра, без учета их маршрутов. Это может приводить к тому, что планируемый маршрут пройдет по самым «популярным» ребрам, даже если они не являются предпочтительными в конкретном случае.

Учет характерных значений курса и скорости.

Для исключения эффекта «популярности» следует определить «характерность» значений курсов и скоростей без явного учета числа судов их реализующих. Здесь оказывается продуктивной идея кластеризации. Пусть по ретроспективным данным определено множество характерных значений вектора скорости судов, находящихся в окрестности выбранного ребра – кластеров значений вектора скорости. Задаваясь соответствующим ребру курсом и предполагаемой скоростью, определим, принадлежит ли указанный вектор скорости одному из кластеров: в этом случае весовой коэффициент ребра a задаётся малым (например, $a = 0.1$). Таким образом, при планировании маршрута предпочтение получают те ребра, которые соответствуют характерному движению. Также возможно определение кластеров только на основе данных о курсе, без учёта предполагаемой скорости судна.

Рёбра на основе ретроспективных данных.

Этот способ определения весов ребер может применяться в том случае, если сетка вершин формируется на основе ретроспективных данных (см. выше). Для ребер, сформированных на основе данных о движении весовой коэффициент ребра задается малым (например, $a = 0.1$). Для тех ребер, которые дополняют исходное множество, делая граф связным, весовой коэффициент принимается большим (например, $a = 1$). Таким образом, предпочтительными становятся уже реализованные маршруты.

При небольшом числе вершин и ребер графа возможных маршрутов судна поиск кратчайшего пути может осуществляться известными детерминированными алгоритмами (Дейкстры, Беллмана-Форда и др.). Сложность наиболее эффективных из них пропорциональна числу ребер и числу вершин (или их логарифму). Если для формирования графа использовать большие выборки ретроспективных данных, число вершин и ребер может оказаться чрезмерно велико для продуктивной работы детерминированных алгоритмов. В этом случае перспективны эвристические алгоритмы: муравьиные и генетические.

Совокупность свойств рассмотренных подходов к построению графа возможных маршрутов судна позволяет предположить, что слоистое разбиение акватории регулярной сеткой вершин является наиболее подходящим для рассматриваемой задачи планирования маршрута через акватории с интенсивным движением. Оно хорошо зарекомендовало себя и в других задачах [9, 10]. Вес ребер задается с учетом характерных значений курса и скорости, определённых путём кластеризации параметров движения.

Для кластеризации вводится метрика – функция, задающей степень близости между объектами [11, 12, 13]. В рассматриваемой задаче эту метрику расстояния между объектами 1 и 2 можно ввести следующим образом:

$$D_{12}^2 = w_{lon}(x_1 - x_2)^2 + w_{lat}(y_1 - y_2)^2 + w_{speed}(v_1 - v_2)^2 + w_{course}(k_1 - k_2)^2.$$

Здесь w_{lon} , w_{lat} , w_{speed} , w_{course} – весовые коэффициенты, которые задаются исходя из данных о характерных размерах кластеров по каждому из измерений. Например, по курсу характерные размеры могут составлять 5-10 градусов, по скорости – 2-3 метра в секунду. Функция разности курсов учитывает периодичность данных по углу. Определение весов по координатам w_{lon} , w_{lat} – это нетривиальная задача, поскольку на акватории могут встречаться как участки маневренного движения размером несколько сотен метров, так и зоны длительного равномерного движения в несколько десятков километров. Поэтому для некоторых приложений (в том числе для рассматриваемой задачи) можно прибегнуть к декомпозиции: осуществлять кластеризацию на отдельных выделенных участках акватории только по скорости и/или курсу.

Для оценки характерных значений курса и скорости представляется подходящими горная и субтрактивная кластеризация, которые не требуют задания количества кластеров [13]. Алгоритм горной кластеризации состоит в следующем. Пусть имеется множество из M объектов и имеется матрица расстояний D_{ij} , задающая степень близости между объектами с индексами i и j . Примем, что сами объекты являются возможными центрами кластеров. Для каждого объекта рассчитывается значение его потенциала:

$$p_i = \sum_{j=1}^M \exp(-\alpha D_{ij}),$$

где α – число, характеризующее масштаб расстояний D_{ij} , $\exp(\)$ – оператор экспоненты. На первом шаге алгоритма выбирают объект с индексом max_1 , имеющий максимальный потенциал, который и будет центром первого кластера. На втором шаге пересчитывают значения потенциалов объектов по формуле:

$$p_i^{(2)} = p_i - p_{max_1} \exp(-\beta D_{imax_1}),$$

где β – число, определяющее размер кластеров. Точка с индексом max_2 с максимальным значением потенциала $p_i^{(2)}$ будет центром второго кластера. Точно также находятся центры всех следующих кластеров, процедура продолжается, например, пока потенциал очередного кластера превышает некоторый заданный порог или пока имеет место разница между потенциалами соседних уровней.

Субтрактивная кластеризация похожа на горную кластеризацию: после нахождения центра первого кластера из множества объектов исключаются те, которые ему принадлежат. Процедура итерационно повторяется пока значение потенциала очередного кластера превышает заданный порог.

Результаты

Исследование проводилось для целого ряда акваторий с использованием реальных данных о движении судов, собранных с ресурса marinetraffic.com с помощью специально разработанной программной системы. Здесь приведён пример успешного решения задачи для Сангарского пролива и Токийского залива. В первом случае для нахождения маршрута судов через акваторию были взяты данные о трафике в течение

одной недели (всего около 1.5 млн записей типа «долгота, широта, скорость, курс»), во втором – в течение 3 дней (всего около 2 млн записей).

Граф возможных маршрутов судна формировался на основе слоистого разбиения акватории регулярной сеткой вершин. Параметры разбиения подбирались таким образом, чтобы длина ребер графа не превышала 3 км. Вес ребер задавался с учётом характерных значений курса на отрезке $[0, 360^\circ)$, определённых путем кластеризации данных о движении в окрестности каждого ребра (Рисунок 1). Если движение по ребру не соответствовало характерному для участка акватории курсу, его вес принимался равным длине дуги большого круга. В противном случае он умножался на весовой коэффициент $\alpha = 0.1$.

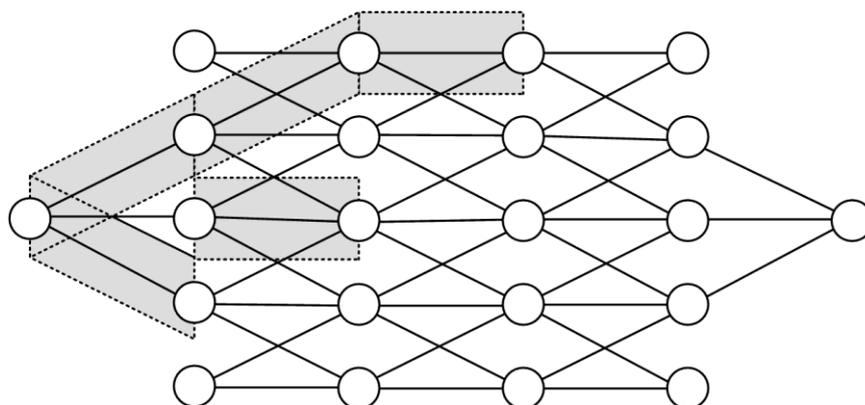


Рисунок 1 – Граф возможных маршрутов судна. Вес ребер определяется на основе данных о движении в окрестности ребра (выделенные серым области)

Figure 1 – Graph of possible ship routes. The weight of the edges is determined based on the movement data in the vicinity of the edge (the areas highlighted in gray)

Использовался стандартный метод субтрактивной кластеризации. Были приняты следующие параметры субтрактивной кластеризации: параметр α соответствует радиусу кластера 16° ; объекты принадлежат кластеру, если лежат ближе, чем в 20° от его центра (1.25α); процедура поиска центров кластеров продолжается, пока потенциал очередного кластера превышает 10 % потенциала первого кластера. Такие значения параметров метода корректно идентифицировали кластеры эталонной выборки данных.

На Рисунке 2 показаны результаты планирования маршрутов Тихий океан – Японское море (восток – запад) и порт Хакодате – залив Муцу (север – юг) и обратно. На Рисунке 3 – планирование маршрута Тихий океан – Иогогама и обратно. Видно, что найденные маршруты полностью соответствуют направлению движения реальных судопотоков, принимают «правильную» сторону движения (показано стрелками, в судовождении принято правостороннее движение). Маршруты «туда» и «обратно» показаны для наглядности красными и зелёными линиями с точками (рёбра и узлы).

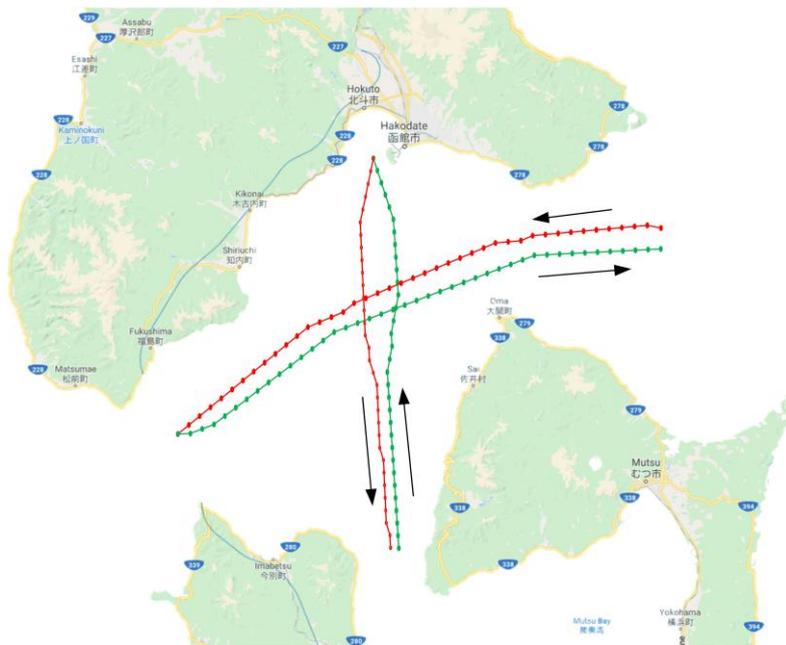


Рисунок 2 – Результаты планирования маршрута судна в Сангарском проливе
Figure 2 – Results of route planning in the Tsugaru Strait



Рисунок 3 – Результаты планирования маршрута судна в Токийском заливе
Figure 3 – Results of route planning in Tokyo Bay

Обсуждение

В связи с развитием новых информационных технологий и концепции e-навигации наметилась эволюция традиционных моделей задач судовождения в направлении описания коллективного движения судов на акватории в целом. Можно отметить работу [14], в которой на основе классической модели корабельного домена оценивается количество опасных сближений судов различных классов на тех или иных участках акватории, выделяются наиболее сложные для движения участки. Этой же задаче посвящены исследования [15], [16], [17]. В работе [18] предложен подход для оценки интенсивности движения на акваториях как функции плотности судов. В исследовании [19] предлагается метод оценки насыщенности трафика, учитывающий геометрические размеры судов. Отмечается, что некоторые акватории обладают ограниченной пропускной способностью для судов больших размеров. Приводится пример, где для безопасного прохождения крупных судов требуется уменьшить их количество. В статье [20] предлагается подход к выбору скорости движения судна на основе ретроспективных данных о трафике конкретной акватории (в статье проанализировано движение судов близ Шанхая). Скорость выбирается в зависимости от плотности трафика. Таким образом неявно учитывается коллективный опыт судоводителей.

Подходы, связанные с кластерным анализом данных о движении судов на акватории, также получают все большее развитие. Они исследуют варианты объектов кластеризации, их признаков, метрик и методов кластеризации. Так, в работе [21] рассматривается задача оценки типичных маршрутов судов на акватории по данным АИС. Метод основан на разбиении акватории на небольшие участки, оценке в них плотности движения, предпочтительных переходов судов между ними, т.е. кластеризация происходит неявно. В результате формируются ломаные – маршруты судов между заданными начальной и конечной точками, учитывающие предыдущий трафик, в т.ч. принятую схему движения судов. Особенностью (и, по-видимому, существенным недостатком) метода является необходимость последующего сглаживания полученных маршрутов.

В работе [22] кластеризация также используется для оценки типичных для акватории маршрутов. Объектами кластеризации являются ломаные, формируемые по ретроспективным данным АИС. Вводится метрика расстояния между ломаными. Алгоритм кластеризации основан на поиске областей связности, предлагается метод подбора параметров алгоритма. В результате выделяются основные маршруты судов в районе интенсивного судоходства (в работе приведён пример для одного из районов Южно-Китайского моря). Это позволяет выделять anomalно движущиеся суда, чей маршрут не характерен для данной акватории. Метод не решает задачу планирования маршрутов. В статье [23] рассматривается похожая задача, объектами кластеризации являются данные о координатах, скоростях и курсах судов. Работа [24] также рассматривает задачу идентификации anomalно движущихся судов, признаками являются их координаты, курсы и скорости. Акватория разбивается прямоугольной сеткой, маршруты судов представляются правилами перехода между клетками сетки. Кластеризация основана на построении гистограмм курсов и скоростей для каждой клетки по данным АИС. Anomalные значения скоростей и курсов идентифицируются по этим гистограммам. Хотя предложенный в работе подход может быть положен в основу задачи планирования маршрута судна, она явно не рассматривается. Недостатком метода является необходимость предобработки данных АИС для построения графа маршрутов, высокая вычислительная сложность соответствующих алгоритмов и необходимость большой выборки данных для построения гистограмм.

Настоящая работа также посвящена приложению кластерного анализа данных о движении судов на акватории для решения классической задачи судовождения – планирования маршрута перехода судна. Такой подход обеспечивает новое качество маршрута – его соответствие устоявшимся параметрам движения, выработанных коллективным профессиональным опытом. Постулируя, что ретроспективные данные о движении на акватории являются результатом позитивной эксплуатационной практики, можно предполагать, что спланированный на их основе маршрут будет самым безопасным из возможных в конкретных навигационных условиях.

Упомянутый метод [24], основанный на определении правил движения методами статистики, является наиболее близким к подходу, предложенному в настоящей работе, где предлагается использовать методы кластеризации. Это позволяет достоверно идентифицировать параметры движения и не требует больших массивов исходных данных. Так, в представленном на Рисунках 2, 3 примере характерное количество данных о курсах судов на «популярных» участках акватории было равно 20-50, на самых насыщенных как правило не превышало 200. Это вполне позволило построить устойчивую картину характерных параметров движения.

Вариант графа возможных маршрутов со слоистым разбиением акватории (Рисунок 1) следует признать удачным. На его основе формируются маршруты, не допускающие чрезмерных изменений курса. Характерное число вершин и ребер графа невелико даже для протяженных маршрутов, что позволяет ограничиться детерминированными методами поиска кратчайшего пути.

Заключение

В работе рассматривается задача планирования маршрута перехода судна через акватории с интенсивным движением. Предлагается подход, основанный на использовании идеи, лежащей в основе технологии больших данных: движение судна должно соответствовать характерным кинематическим параметрам движения, определяемым по ретроспективной информации о трафике. Это позволяет учесть коллективный опыт судовождения на конкретной акватории.

Модельные представления задачи включают в себя граф возможных маршрутов судна и функцию «желательности» параметров движения. В работе рассмотрено несколько возможных вариантов модели. Обосновывается выбор в пользу слоистого разбиения акватории регулярной сеткой вершин. Вес ребер графа определяется по результатам кластеризации ретроспективных данных о движении.

Способ построения графа возможных маршрутов судна позволяет уменьшить размерность данных при кластеризации: акватория разбивается на небольшие участки, кластеризация данных о движении осуществляется для каждого из участков отдельно. Признаками объектов являются курсы и скорости движения (совместно или по отдельности). Указывается, что предпочтительнее использовать методы кластеризации, не требующие предварительного задания количества кластеров, например, горной и субтрактивной кластеризации.

Источником данных о трафике акватории могут служить сервисы Автоматической идентификационной системы. В работе показана возможность использования данных АИС, доступных на специализированных интернет-ресурсах. Несмотря на «разреженность» этих выборок данных, они достаточно адекватно представляют сводные особенности трафика.

В работе приведены примеры планирования маршрута перехода через Сангарский пролив и Токийский залив. Видно, что найденные маршруты достаточно хорошо

соответствуют характерному движению судов по акватории, что подтверждает перспективность предложенного подхода для практики.

Благодарности

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект 20-38-90018.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 20-38-90018.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhao L., Shi G. Maritime anomaly detection using density-based clustering and recurrent neural network. *Journal of Navigation*. 2019;72(4):894-916.
2. 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.
3. *Общие положения об установлении путей движения судов*, № 9036. Издание ГУНиО МО СССР. 1987.
4. Першина Л.А., Астреина Л.Б. Выбор маршрута судна на основе погодных условий. *Эксплуатация морского транспорта*. 2019;(2):30-38.
5. Wang H.B., Li X.B., Li P.F., Veremey E.I., Sotnikiva M.V. Application of real-coded genetic algorithm in ship weather routing. *Journal of Navigation*. 2018;28(4):989-1010.
6. 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.
7. Титов А.В., Баракат Л., Чанчиков В.А., Тактаров Г.А., Ковалев О.П. Системы управления безэкипажными судами. *Морские интеллектуальные технологии*. 2019;1-4 (43):109-120.
8. Каретников В.В., Козик С.В., Буцанец А.А. К вопросу оценки рисков использования безэкипажных средств водного транспорта на участке акватории. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2019;(6):987-1002.
9. Акмайкин Д.А., Букин О.А., Гриняк В.М., Москаленко М.А. Планирование маршрута перехода судна с учётом опасности морского волнения. *Морские интеллектуальные технологии*. 2018;4-5(42):148-152.
10. Akmaykin D.A., Grnyak V.M. Ships route searching with respect of sea waves danger. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;272:032103.
11. Bishop C.M. *Pattern recognition and machine learning*. New York: Springer Science Business Media. 2006.
12. Bezdek J.C. *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*. Boston: Springer. 1981.
13. Yager R., Filev D. *Essentials of fuzzy modeling and control*. New York: John Wiley & Sons. 1994.
14. Debnath A., Chin H.Ch. Modelling collision potentials in port anchorages: application of the navigational traffic conflict technique (NTCT). *Journal of Navigation*. 2016;69(1):183-196.

15. 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.
16. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Шуленина А.В. Оценка эмоциональной нагрузки на судоводителей в условиях коллективного движения. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2019;(4):640-651.
17. Гриняк В.М., Горошко О.А., Девятисильный А.С. Система экспертного оценивания и визуализации параметров траектории безопасного движения судна. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017;(2):127-134.
18. Liu Z., Wu Zh., Zheng Zh. Modelling ship density using a molecular dynamics approach. *Journal of Navigation*. 2020;73(3):628-645.
19. Weng J., Liao Sh., Yang D. Methodology for estimating waterway traffic capacity at shanghai estuary of the Yangtze river. *Journal of Navigation*. 2020;73(1):75-91.
20. Wang L., Li Y., Wan Zh., Yang Z., Wang T., Guan K., Fu L. Use of AIS data for performance evaluation of ship traffic with speed control. *Ocean Engineering*. 2020;204.
21. Naus K. Drafting route plan templates for ships on the basis of AIS historical data. *Journal of Navigation*. 2019;73(3):726-745.
22. Zhao L., Shi G. Maritime anomaly detection using density-based clustering and recurrent neural network. *Journal of Navigation*. 2019;72(4):894-916.
23. 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.
24. 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. Zhao L., Shi G. Maritime anomaly detection using density-based clustering and recurrent neural network. *Journal of Navigation*. 2019;72(4):894-916.
2. 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.
3. *Obshchiye polozheniya ob ustanovlenii putey dvizheniya sudov (General provisions on the establishment of ship routes)*, № 9036, MO SSSR. 1987.
4. Pershina L.A., Astreina L.S. *Ship routing based on weather conditions*. *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. 2019;(2):30-38.
5. Wang H.B., Li X.B., Li P.F., Veremey E.I., Sotnikiva M.V. Application of real-coded genetic algorithm in ship weather routing. *Journal of Navigation*. 2018;28(4):989-1010.
6. 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.
7. Titov A.V., Barakat L., Chanchikov V.A., Taktarov G.A., Kovalev O.P. Control systems of unmanned vessels. *Marine Intellectual Technologies*. 2019;43(1-4):109-120.
8. Karetnikov V.V., Kozik S.V., Butsanets A.A. Risks assessment of applying unmanned means of water transport in the water area. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 2019;(6):987-1002.

9. Akmaykin D.A., Bukin O.A., Grinyak V.M., Moskalenko M.A. Ships route planing with the account of dangerous sea waves. *Marine Intellectual Technologies*. 2018;42(4-5):148-152.
10. Akmaykin D.A., Grnyak V.M. Ships route searching with respect of sea waves danger, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;272:032103.
11. Bishop C.M. *Pattern recognition and machine learning*. New York: Springer Science Business Media. 2006.
12. Bezdek J.C. *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*. Boston: Springer, 1981.
13. Yager R., Filev D. *Essentials of fuzzy modeling and control*. New York: John Wiley & Sons. 1994.
14. Debnath A., Chin H.Ch. Modelling collision potentials in port anchorages: application of the navigational traffic conflict technique (NTCT). *Journal of Navigation*. 2016;69(1):183-196.
15. 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. *Modelling, Optimization and Information Technologies*. 2020;8(1):40-41.
16. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S., Shulenina A.V. Estimation of the emotional load on the navigators under the conditions of heavy traffic. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 2019;(4):640-651.
17. Grinyak V.M., Goroshko O.A., Devyatisilny A.S. Expert system for evaluation and visualization of the parameters of the marine traffic safety. *Mechatronics, automation, control*. 2017;(2):127-134.
18. Liu Z., Wu Zh., Zheng Zh. Modelling ship density using a molecular dynamics approach. *Journal of Navigation*. 2020;73(3):628-645.
19. Weng J., Liao Sh., Yang D. Methodology for estimating waterway traffic capacity at shanghai estuary of the Yangtze river. *Journal of Navigation*. 2020;73(1):75-91.
20. Wang L., Li Y., Wan Zh., Yang Z., Wang T., Guan K., Fu L. Use of AIS data for performance evaluation of ship traffic with speed control. *Ocean Engineering*. 2020;204.
21. Naus K. Drafting route plan templates for ships on the basis of AIS historical data. *Journal of Navigation*. 2019;73(3):726-745.
22. Zhao L., Shi G. Maritime anomaly detection using density-based clustering and recurrent neural network. *Journal of Navigation*. 2019;72(4):894-916.
23. 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.
24. 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, д-р. техн. наук, доцент, кафедра Информационных технологий и систем, ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса», Владивосток, Российская Федерация.
e-mail: victor.grinyak@gmail.com
ORCID: [0000-0003-0549-230X](https://orcid.org/0000-0003-0549-230X)

Victor M. Grinyak, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Information Technologies Department, Federal State State-financed Educational Institution of Higher Education “Vladivostok State University of Economics and Service”, Vladivostok, Russian Federation

Шуленина Алёна Викторовна, аспирант, кафедра Прикладной математики, механики, управления и программного обеспечения, ФГАОУ ВО «Дальневосточный Федеральный университет», Владивосток, Российская Федерация.

e-mail: shuleninaav@mail.ru

Alena V. Shulenina, PhD Student, Applied Mathematics, Mechanics, Control and Software Department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Far Eastern Federal University", Vladivostok, Russian Federation.

Прудникова Лариса Ивановна, канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра Прикладной математики, механики, управления и программного обеспечения, ФГАОУ ВО «Дальневосточный Федеральный университет», Владивосток, Российская Федерация.

e-mail: prudnikova.lv@dvfu.ru

Larisa I. Prudnikova, PhD (Math.), Associate Professor, Applied Mathematics, Mechanics, Control and Software Department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Far Eastern Federal University", Vladivostok, Russian Federation.

Девятисильный Александр Сергеевич, д-р. техн. наук, профессор, сектор Управления и навигации, ФГБУН «Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук», Владивосток, Российская Федерация.

e-mail: devyatis@dvo.ru

Alexander S. Devyatisilnyi, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Navigation and Control Department, Federal State State-financed Science Institution "Institute of Automation and Control Processes FEBRAS", Vladivostok, Russian Federation.