

К оценке эффективности алгоритмов погодной маршрутизации

М. В. Коровкин*, С. В. Погожев, М. В. Сотникова

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

199034, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9

* m.korovkin@spbu.ru

Аннотация

В статье рассмотрены общая постановка двух базовых задач погодной маршрутизации, предложены меры оценки эффективности алгоритмов их решения, не зависящие от особенностей их реализации. Построение оптимального маршрута предполагается осуществлять в несколько этапов: генерация начального множества допустимых маршрутов, их оптимизация, выбор лучшего маршрута в соответствии с выбранным критерием. Для первого этапа исследована возможность использования варианта алгоритма A^* с учетом заданного времени плавания и изменения скорости хода судна. Дискретизацию пространства поиска для третьего измерения (времени) предлагается осуществлять за счет решения оптимизационной задачи о выборе заданной скорости хода на участке маршрута. В качестве иллюстрации возможностей трехмерной версии алгоритма приведены примеры расчетов нескольких маршрутов с оценкой его эффективности в сравнении с версией алгоритма, использующей постоянную скорость хода в качестве параметра, для обоих типов задач. Показано, что возможность получения качественных экономичных маршрутов для трехмерной версии алгоритма достигается только при определенном выборе параметров, и характеризуется существенно большими вычислительными затратами. Для задачи о построении маршрутов с заданной длительностью трехмерная версия алгоритма обеспечивает лучшее качество маршрутов, но при этом также за счет роста вычислительных затрат.

Ключевые слова: погодная маршрутизация, оценка эффективности, сравнение алгоритмов

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-07-00531 «Разработка теоретических основ, практических методов и цифровых технологий для решения задач многоцелевого интеллектуального управления подвижными объектами».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Коровкин, М. В. К оценке эффективности алгоритмов погодной маршрутизации / М. В. Коровкин, С. В. Погожев, М. В. Сотникова. – DOI 10.25559/SITITO.17.202102.275-284 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2021. – Т. 17, № 2. — С. 275-284.

© Коровкин М. В., Погожев С. В., Сотникова М. В., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



On Assessment of Efficiency of Weather Routing Algorithms

M. V. Korovkin*, S. V. Pogozhev, M. V. Sotnikova

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation
7/9 Universitetskaya Emb., St Petersburg 199034, Russian Federation

* m.korovkin@spbu.ru

Abstract

The article discusses the general setting of two basic weather routing problems and proposes measures for evaluating the effectiveness of algorithms for solving them, which are independent of the peculiarities of their implementation. The construction of the optimal route is intended to be carried out in several stages: generation of the initial set of allowable routes, their optimization, and selection of the best route according to the chosen criterion. For the first stage, the possibility of using the variant of the A* algorithm was studied, taking into account the specified sailing time and changing the speed of the vessel. It is proposed to discretize the search space for the third dimension (time) by solving the optimization problem of choosing a set speed on a route section. As an illustration of the capabilities of the three-dimensional version of the algorithm, examples of calculations of several routes with an assessment of its effectiveness are given in comparison with the version of the algorithm that uses a constant travel speed as a parameter for both types of problems. It is shown that the possibility of obtaining high-quality economical routes for the three-dimensional version of the algorithm is achieved only with a certain choice of parameters, and is characterized by significantly higher computational costs. For the problem of constructing routes with a given length, a three-dimensional version of the algorithm provides better route quality, but also due to increased computational costs.

Keywords: weather routing, performance evaluation, comparison of algorithms

Funding: The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 20-07-00531 "Development of Theoretical Foundations, Practical Methods and Digital Technologies for Solving Problems of Multi-Purpose Intelligent Control of Mobile Objects."

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Korovkin M.V., Pogozhev S.V., Sotnikova M.V. On Assessment of Efficiency of Weather Routing Algorithms. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2021; 17(2):275-284. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITI-TO.17.202102.275-284>



Введение

В настоящее время область применения алгоритмов оптимизации к проблеме погодной маршрутизации существенно расширяется. Несмотря на множество публикаций на эту тему, основной проблемой, препятствующей эффективному использованию полученных результатов, является отсутствие универсальных моделей движения судов в заданных погодных условиях, а также невозможность сопоставить алгоритмы, предлагаемые различными авторами. В обширном обзоре основных существующих алгоритмов, приведенном в [1], делается попытка оценить их количественные характеристики. К сожалению, до сих пор не представлено какого-либо общего способа оценивания данных алгоритмов, который бы позволил выбирать те или иные варианты в зависимости от конкретности решаемых задач. Для решения данного вопроса прежде всего необходимо рассмотреть критерии оценивания для подобных алгоритмов. Кроме того, в качестве вспомогательных сведений для выбора алгоритма можно рассмотреть следующие классификации постановок задач погодной маршрутизации:

- по типу модели изменения скорости судна в зависимости от внешних условий: точная (т.е. при известных параметрах — длине, ширине корпуса, загрузке и т.д., управляющих сигналах — заданных скорости и курсе, и прогнозе погодных условий в форме зависимых от времени и местоположения значений скорости и направления ветра, волнения и т.д., позволяющая оценить/предсказать истинную скорость судна) и вероятностная (обеспечивающая некоторые оценки для скорости в силу неточности условий плавания и параметров судна). Из [2] известно, что в особых условиях плавания имеется существенное различие между значениями заданной и предсказанной моделью скорости хода;
- по способу представления маршрута: непрерывный и дискретный по времени и местоположению судна (что в некоторых случаях объясняется дискретностью имеющегося прогноза погоды или информации, предоставляемой геоинформационной системой);
- по цели построения маршрута: наиболее широко известными здесь являются минимальное время плавания или потребление топлива, а также более сложные варианты, такие как безопасность в [3] и многокритериальные постановки [4];
- по типу учитываемых ограничений в дополнение к естественным требованиям безопасности плавания, таких как, например, заданное время прибытия в порт назначения и других.

С очевидностью можно утверждать, что любая реализация алгоритмов погодной маршрутизации будет использовать возможности некоторой геоинформационной системы. В связи с этим можно рассматривать количество вызовов данного компонента в качестве возможной универсальной меры эффективности. При этом будет учитываться тот факт, что подобные вызовы являются одними из наиболее частых и ресурсоемких,

что является простым следствием требований к безопасности плавания. В качестве другого критерия эффективности можно рассмотреть количество оценок скорости хода судна при известном прогнозе погоды. В силу независимости от выбора ГИС, источника прогноза погоды и типа модели для определения скорости хода указанные критерии могут рассматриваться как универсальные.

Основываясь на общих подходах к решению оптимизационных задач и идеях, представленных в [1], можно рассмотреть следующий процесс поиска оптимальных маршрутов, допускающий параллельную реализацию. На первом этапе осуществляется генерация допустимых маршрутов, близких к оптимальному в определенной степени. На текущий момент существует несколько основных алгоритмов, которые могут быть задействованы при этом [8]. Полученные на первом этапе маршруты могут быть подвергнуты улучшению с помощью алгоритмов оптимизации, способных учитывать параметризацию маршрутов и имеющиеся ограничения. Последний этап может реализовывать процедуру выбора наилучших из найденных маршрутов. Поскольку каждый из этих этапов может быть реализован с использованием различных алгоритмов, что потенциально может привести к большому количеству маршрутов, необходимо иметь возможность выбирать наиболее подходящие комбинации алгоритмов.

В работе представлены результаты анализа данного подхода, что может быть полезно для будущих реализаций систем погодной маршрутизации.

Задача построения маршрута с минимальным расходом топлива при заданном времени плавания была рассмотрена в [11], где авторы предложили использовать особый итеративный вариант алгоритма динамического программирования. Авторы [3], напротив, поставили под сомнение возможность достижения какой-либо экономии топлива на маршруте, в то время как планирование осуществлялось с целью повышения некоторого показателя мореходности. Несмотря на представленные в [11] результаты расчета одного маршрута, оптимального по расходу топлива, авторы не привели результатов сравнения эффективности с другими вариантами алгоритмов. В работах [3], [11] и [12] в качестве начального маршрута принимался участок дуги большого круга, соединяющий начальную и конечную точки маршрута, не принимая во внимание наличие каких-либо ограничений в виде участков суши. В отличие от указанных, итеративные подходы в [7], [13] были лишены этого недостатка¹. При этом в большинстве предложенных алгоритмов предлагался монолитный подход к планированию, в то время как в [14] была представлена идея разбиения процедуры поиска на несколько последовательно выполняемых этапов. В [15] представлена идея трехмерного подхода (с учетом времени) для организации поиска маршрута с помощью динамического программирования.

Постановка задачи

В качестве математической постановки задачи маршрутизации рассмотрим следующую точную формулировку, базирующуюся

¹ Hagiwara H. Weather routing of (sail-assisted) motor vessels: Ph.D. Thesis. Delft: Technical University of Delft, 1989. 337 p. URL: <http://dspace.unive.it/handle/10579/8107> (дата обращения: 26.04.2021).



щуются на результатах [5]. Для заданного сферического прямоугольника, где ψ и λ — широта и долгота соответственно, и некоторого количества статических запретных областей $\Omega_k^s, k = 1..n$ может быть рассмотрено допустимое статическое множество $\Omega_s = \Omega_0 \setminus \bigcup_{k=1..n} \Omega_k^s$, точки которого могут быть использованы в качестве точек маршрута. Кроме этого, необходимо рассмотреть динамические запретные области $\Omega_j^d(t), j = 1..m$, зависящие не только от текущего прогноза погодных условий, но и параметров движения судна по маршруту. Аналогично может быть получено допустимое динамическое множество в виде $\Omega_d(t) = \Omega_0 \setminus \bigcup_{j=1..m} \Omega_j^d(t)$.

Таким образом, любой допустимый маршрут должен будет содержаться в пересечении $\Omega_a(t) = \Omega_s \cap \Omega_d(t)$: $(\psi(t), \lambda(t)) \in \Omega_a(t), t \in [t_0, t_1]$, где t_0 и t_1 — время отправки и время прибытия соответственно.

При заданных начальном $A(\psi(t_0), \lambda(t_0)) \in \Omega_a$ и конечном $B(\psi(t_1), \lambda(t_1)) \in \Omega_s$ положениях судна, рассмотрим маршрут как конечную последовательность путевых точек $A, P_1, P_2, \dots, P_r, B$, для каждой из которых, за исключением последней, заданы параметры плавания, что позволяет однозначно определить сам маршрут. Данные параметры могут быть объединены в вектор μ , включающий заданную скорость хода, тип участка (вдоль линии румба или по большому кругу) и другие. Совместно с координатами путевых точек мы получаем вектор $\gamma = (\psi_1, \lambda_1, \dots, \psi_r, \lambda_r, \mu)$, однозначно задающий выбранный маршрут.

Будем предполагать, что имеющаяся математическая модель движения судна, а также прогноз погодных условий и данные ГИС обеспечивают возможность оценки каждого планируемого маршрута, т.е. для любого его участка мы должны иметь возможность движения по нему, а также, зная время начала движения и вектор параметров γ , вычислять время прибытия в любую промежуточную точку, а также расход топлива и другие показатели по необходимости. Также будем считать, что для оценки качества построенного маршрута используется один скалярный показатель качества и наилучшему маршруту соответствует его минимум:

$$J(\gamma) \rightarrow \min_{\gamma \in \Gamma_a} \quad (1)$$

Здесь вектор параметров содержится во множестве Γ_a всех векторов параметров, соответствующих допустимым маршрутам $r(t) \in \Omega_a$.

Подобная постановка характерна для задач о поиске маршрутов обеспечивающих минимальное время плавания или расход топлива на маршруте. Для задач минимизации расхода топлива при заданном времени прибытия ETA^* необходимо рассматривать дополнительное нелинейное ограничение вида, при этом задача минимизации приобретает вид:

$$\begin{aligned} J(\gamma) &\rightarrow \min_{\gamma \in \Gamma_a} \\ ETA(\gamma) &= ETA^* \end{aligned} \quad (2)$$

Необходимо отметить, что множество Γ_a из (1) и (2) не является подмножеством некоторого линейного пространства, тем самым нет возможности применить какие-либо традиционные алгоритмы оптимизации для решения (1) и (2). Чтобы иметь возможность воспользоваться ими, необходимо редуцировать задачи к случаю с конечномерным вектором γ . По-

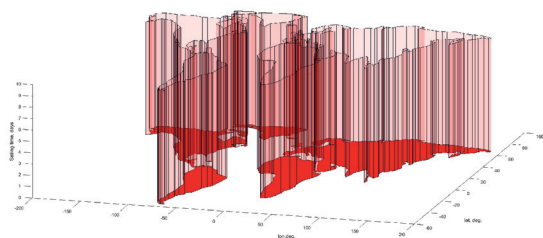
скольку изначально отсутствуют какие-либо предположения о размерности γ , необходимо выполнить начальный поиск допустимых маршрутов. Для этого могут быть применены известные алгоритмы поиска маршрута для (1). Задача (2) с дополнительным ограничением является существенно более сложной по сравнению с (1), что также справедливо и для поиска начального приближения. Поиск оптимального решения в (1) и (2) может быть осуществлен с использованием алгоритмов решения нелинейных задач с ограничениями, таких как последовательное квадратичное программирование, метода штрафных функций Лагранжа, генетических алгоритмов и др. В случае задания маршрута как конечного набора путевых точек можно рассмотреть два подхода к построению допустимых маршрутов, базирующихся на графовых моделях. В рамках обоих подходов используется некоторая схема квантизации пространства поиска и последовательно генерируются пробные участки на основе частично построенных маршрутов. В данном случае целью квантизации является сокращение расходов памяти и машинного времени. Модифицированный алгоритм изохрон [7] можно отнести к классу алгоритмов, формирующих отдельные путевые точки маршрутов в зависимости от погодных условий, в то время как алгоритмы, базирующиеся на A^* , могут использовать предопределенную сеть узлов. Результаты анализа данных алгоритмов приведены в [8].

Предположение о постоянстве заданной скорости хода на маршруте существенно упрощает процедуру поиска начального множества, но в некоторых случаях не позволяет получить допустимые маршруты. Эмпирический подход, предложенный в [8] для задач с минимизацией времени/расхода топлива на маршруте, предполагающий использование дискретного набора значений скорости хода также не гарантирует нахождение допустимого маршрута. Для более тщательного отбора маршрутов необходимо допустить возможность вариации заданной скорости хода на отдельных участках маршрута. Основная идея данного подхода предложена в [5], [9]. Запретные области могут быть представлены в виде трехмерных тел в пространстве (широта, долгота, время), при этом статические области $\Omega_k^s, k = 1..n$ в данном случае ограничиваются некоторыми цилиндрическими поверхностями, в то время как динамические запретные области будут иметь достаточно произвольную форму (рис. 1 и 2).

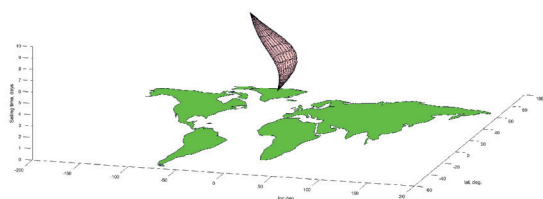
Все допустимые маршруты с необходимостью располагаются в множестве $([t_0, t_{\max}] \times \Omega_0) / (\bigcup_{k=1..n} \Omega_k^s) / (\bigcup_{j=1..m} \Omega_j^d)$, что позволя-

ет задать в нем сетку точек (в простейшем варианте регулярную, вида $(t_0 + k\Delta t, \psi_0 + l\Delta\psi, \lambda_0 + m\Delta\lambda), k, l, m = 1, 2, \dots$) за исключением точек лежащих в запретных областях). С учетом особенностей рассматриваемого судна, таких как осадка, прогнозируемая скорость и т.д., точки (t_1, ψ_1, λ_1) и (t_2, ψ_2, λ_2) , где $t_1 : t_1 < t_2$ — время выхода из первой из данных точек, могут быть соединены дугами, не пересекающимися запретные области, образуя участки маршрута. Для этого необходимо выбрать заданную скорость хода V_1 таким образом, чтобы обеспечивалось заданное время достижения t_2 следующей точки.





Р и с. 1. Пример статических запретных областей:
 Ω_k^s (красный) и $\bar{\Omega}_k^s$ (красный прозрачный)
F i g. 1. An example of static restricted areas:
 Ω_k^s (red) and $\bar{\Omega}_k^s$ (red transparent)



Р и с. 2. Пример динамической запретной области $\bar{\Omega}_k^s$ (красный прозрачный)
F i g. 2. An example of a dynamic restricted area $\bar{\Omega}_k^s$ (red transparent)

Для этого необходимо решить уравнение вида

$$ETA(V_1, t_1, \psi_1, \lambda_1, \psi_2, \lambda_2) = t_2$$

относительно заданной скорости хода V_1 , где ETA — время прибытия из точки (t_1, ψ_1, λ_1) в (t_2, ψ_2, λ_2) в соответствии с прогнозом погоды и моделью изменения скорости судна. В случае, если решение уравнения (3) может быть найдено в диапазоне допустимых скоростей $[V_{\min}, V_{\max}]$, две указанные точки могут быть соединены дугой маршрута. Получаемый таким образом граф является ориентированным, поскольку движение от одной точки до другой возможно лишь в направлении увеличения времени. После задания графа осуществляется поиск оптимального пути в нем в соответствии с выбранным критерием оптимальности. Некоторые алгоритмы (например, основанные на A^*) не требуют предварительного построения графа. Эта особенность может быть с успехом использована, поскольку для длинных маршрутов размерность получаемого графа будет большой, а решение уравнения (3) необходимо выполнять для каждого ребра в нем. Для успешного применения подобных алгоритмов поиска маршрута для задач минимизации времени/расхода топлива необходимо учитывать следующую особенность: поскольку время прибытия в конечную точку маршрута не является заранее заданным, алгоритм поиска пути на графе должен будет принимать во внимание все узлы графа, имеющие значения широты и долготы, совпадающие с конечной точкой. К счастью, алгоритмы семейства A^* могут быть реализованы с поддержкой данной возможности. Для задачи о минимизации расхода топлива при заданном времени прибытия необходимости в модификации алгоритма поиска пути не возникает, поскольку в этом случае конечная точка в трехмерном пространстве единственна.

Результаты

Приведем описание исходных данных для вычислительных экспериментов. Целью данных экспериментов было сравнение качества допустимых маршрутов, получаемых с помощью вариантов алгоритма A^* для постоянной и изменяемой скорости хода. В качестве наиболее важных свойств рассматривались возможность построения маршрута и потребление топлива на маршруте. Для расчетов использовался прогноз погоды с шагом 0.5 градуса по широте и долготе и 6 часов по времени с линейной интерполяцией, содержащий сведения о направлении и скорости ветра и течения, направлении, периоде и высоте волнения. Граф строился на основе икосаэдральной сетки с шагом ячейки приблизительно равным 59 милям. Сетка узлов была ориентирована вдоль большого круга, соединяющего точки отправления и прибытия. Для поиска маршрута, оптимального по расходу топлива, была задействована версия алгоритма с постоянной скоростью хода начиная с 10 узлов и с шагом 0.5 узла [8]. Для варианта алгоритма с изменением скорости хода при решении уравнения (3) в качестве начальных значений заданной скорости хода были использованы V_{\min} , $(V_{\max} + V_{\min})/2$, V_{\max} . По сравнению с вариантом алгоритма, предложенном в [5], [9] были исключены некоторые значения времени на сетке для достижения разумного времени счета. Также с целью ускорения расчетов был использован упрощенный набор данных о границах береговой линии из пакета Matlab. Все генерируемые участки маршрута проверялись на пересечение с береговой линией с целью проверки допустимости планируемого маршрута при условии, что начальная точка участка располагается на водной поверхности.

Параметры судна

Все вычислительные эксперименты проводились с моделью грузового судна со следующими параметрами: длина между перпендикулярами — 355 м; ширина — 65 м; осадка — 23.0 м; коэффициент полноты ватерлинии — 0.9375; водоизмещение — 453463.2 т; максимальная скорость — 15 уз, крейсерская скорость — 10 уз.

Сравнение алгоритмов

Для определения возможностей версии алгоритма A^* с изменением скорости по построению допустимых маршрутов в зависимости от шага Δt сетки по времени были проведены несколько расчетов: шесть маршрутов, соединяющих порты Дакара, Майами и Лиссабона, а также четыре маршрута, соединяющих точку в Тихом океане с портами Сан-Франциско и Мельбурна. Пробные точки оценивались по достигнутому и предполагаемому расходу топлива (соответственно функции $\hat{g}(\cdot)$ и $\hat{h}(\cdot)$) в оригинальном описании алгоритма A^* [10]). Предполагаемый расход топлива вычислялся вдоль дуги большого круга, соединяющей текущую точку с точкой назначения, для заданной крейсерской скорости хода. Результаты расчетов приведены в таблице 1.



Т а б л и ц а 1. Количество найденных маршрутов в зависимости от шага Δt Table 1. Number of routes found depending on the step Δt

Шаг Δt , мин.	Найдено маршрутов
30	6
15	8
6	8

В то же время, версия алгоритма с постоянной скоростью на той же самой сетке по широте, долготе обеспечила нахождение всех 10 допустимых маршрутов. Данный факт может являться следствием дискретизации по времени, осуществляемой в алгоритме с изменением скорости хода. Сравнение количества маршрутов с меньшим расходом топлива приведено в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Сравнение по количеству маршрутов с меньшим расходом топлива

Table 2. Comparison by number of routes with lower fuel consumption

Шаг Δt , мин.	A* : A* 3D
30	4:2
15	6:2
6	1:7

Из сравнения видно, что уменьшение шага дискретизации по времени обеспечивает улучшение показателя расхода топлива для версии A* с изменением скорости хода. Сравняя расход топлива в абсолютных единицах, максимальный выигрыш в районе 40 % был получен для маршрута Майами — Дакар, в то время как для большинства маршрутов этот выигрыш составил около 2 % для $\Delta t = 6$ мин. Результирующие маршруты для рейса Майами– Дакар приведены на рис. 3 и 4 совместно с множествами путевых точек, задействованных при вычислении маршрута. Необходимо отметить, что невозможность для алгоритма с постоянной скоростью хода сформировать лучший маршрут в данном случае является следствием сложных погодных условий в районе порта назначения, что привело к выбору повышенной заданной скорости хода и существенным изменениям в конфигурации маршрута [16-21]. Распределение скорости для данного маршрута приведено на рис. 5.

Для обоих экспериментов эффективность алгоритмов также оценивалась по количеству проверок допустимости участков маршрута посредством ГИС и прогнозов скорости хода [22-25]. При этом вариант алгоритма с фиксированной скоростью оказался в абсолютном выигрыше, обеспечивая долю от 0.03 до 0.8 количества проверок для ГИС и от $3e-5$ до $2e-3$ количества оценок скорости хода для версии с варьируемой скоростью хода.

Другой набор экспериментов был проведен для определения возможностей варианта A* с изменяемой скоростью в задаче с фиксированным временем прибытия. При этом рассматривались два маршрута: между Дакаром и Лиссабоном (1484 морских мили по большому кругу) (I) и Майами и Лиссабоном — 3548 морских миль соответственно (II). Предварительно были проведены вычисления маршрутов с наименьшим временем

плавания / наименьшим расходом топлива с использованием версии A* с постоянной скоростью хода. Результаты для этих маршрутов приведены в табл. 3. По найденным верхнему (T_{cruise}) и нижнему (T_{min}) значениям длительности, были выбраны четыре варианта времени прибытия для первого маршрута (120, 140, 160 и 180 часов), и три — для второго (300, 320 и 340 часов соответственно). Вариант алгоритма с фиксированной скоростью хода при задании скорости хода на диапазоне от V_{min} до V_{max} с шагом 0.1 узла был использован для нахождения маршрутов со временем прибытия наиболее близким к заданному. Для алгоритма с изменяемой скоростью хода, в отличие от первой серии экспериментов, был использован альтернативный принцип задания скорости — по заданному значению времени прибытия в конечную точку участка маршрута. На каждой дуге использовалось полное множество значений времени прибытия с шагом — , равным 0.1 часа, между минимальным и максимальным значением полученного для данной точки времени прибытия (рис. 6).

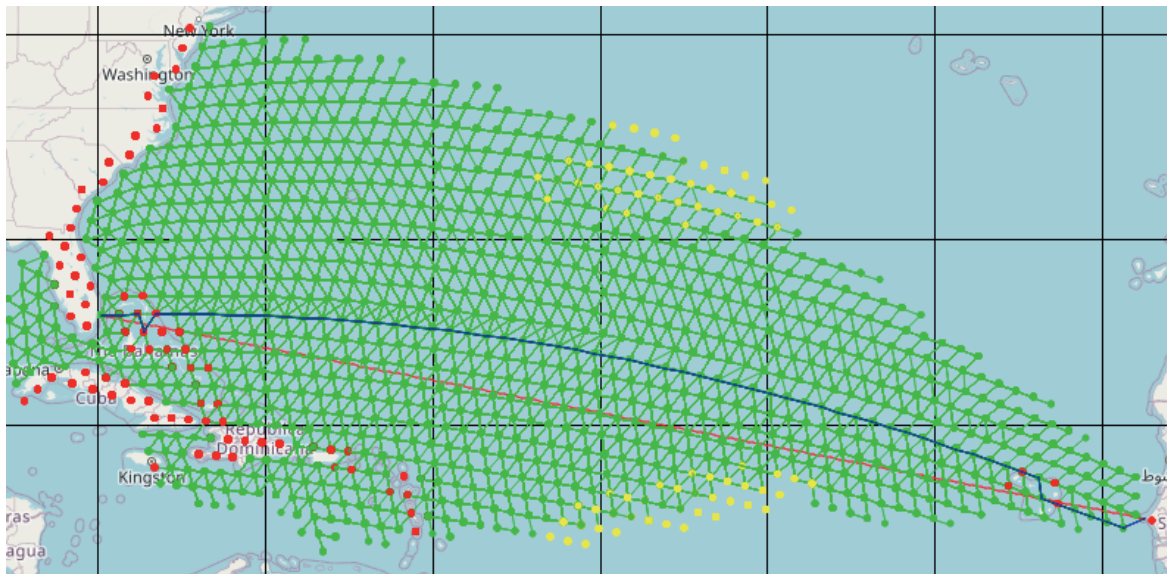
Для оценки пробных точек в трехмерном пространстве (t, ψ, λ) мы использовали следующий вариант манхэттенского расстояния: $\hat{g}(\cdot) = g_{\psi\lambda}(\cdot) + g_t(\cdot)$ $\hat{h}(\cdot) = h_{\psi\lambda}(\cdot) + h_t(\cdot)$, где $g_{\psi\lambda}(\cdot)$ — количество узлов, составляющих частично найденный маршрут, $g_t(\cdot)$ количество интервалов времени длины Δt с момента отплытия, $h_{\psi\lambda}(\cdot)$ — расстояние по большому кругу до порта назначения по большому кругу, разделенное на постоянную длину шага сетки, а $h_t(\cdot)$ есть абсолютное значение разности между желаемым и прогнозируемым временем прибытия для дуги большого круга, соединяющей текущую точку с точкой назначения, при движении с текущей скоростью хода, разделенной на Δt . Для сокращения количества рассматриваемых маршрутов была использована следующая эвристика: если точка назначения не может быть достигнута за заданное время из текущей точки, текущая точка отбрасывалась. Выбор функции оценивания обеспечил разумное время расчета с получением результатов, представленных в таблице 4. Вариант алгоритма с изменяемой скоростью хода обеспечил построение маршрутов с меньшим расходом топлива и лучшей точностью достижения заданного времени прибытия по сравнению с вариантом с постоянной скоростью хода, однако это качество было получено ценой существенно возросших вычислительных затрат.

Т а б л и ц а 3. Пределы для задачи с ограничением времени плавания

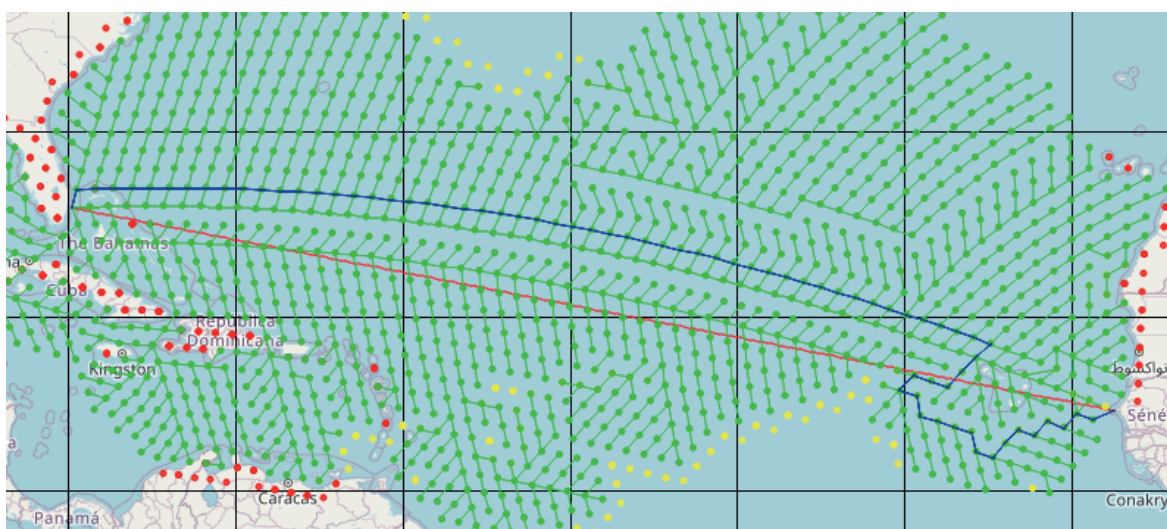
Table 3. Limits for a problem with limited sailing time

Маршрут	Быстрый маршрут, длительность, ч.	Быстрый маршрут, расход топлива, ед.	Экономичный маршрут, длительность, ч.	Экономичный маршрут, расход топлива, ед.
I	114.89	487.01	185.92	63.98
II	270.44	1127.13	448.03	154.17

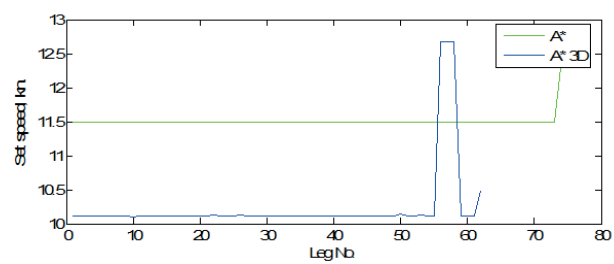




Р и с. 3. Маршрут Майами — Дакар, версия A* с изменяемой скоростью хода. Картография © Openstreetmap
F i g. 3. Miami — Dakar Route, version A* with variable speed

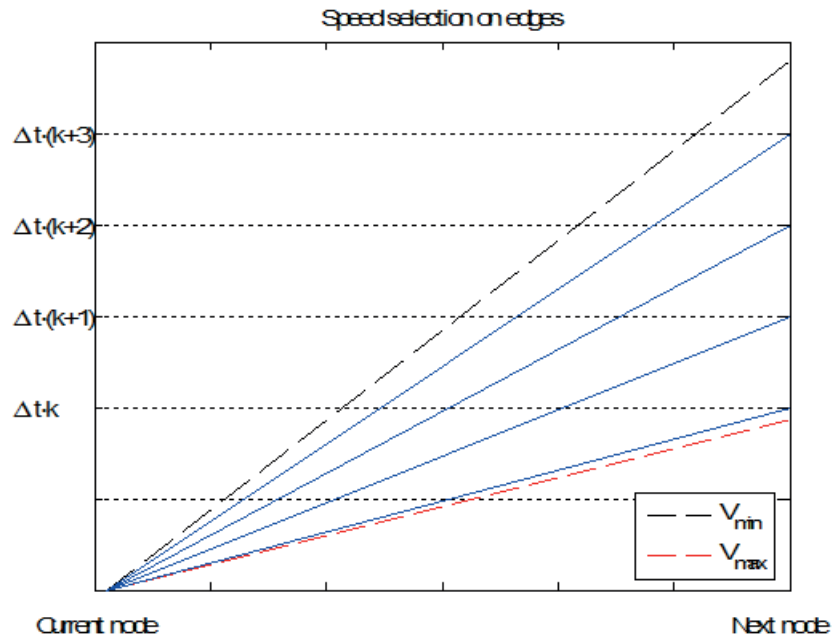


Р и с. 4. Маршрут Майами — Дакар, версия A* с постоянной скоростью хода
F i g. 4. Miami — Dakar route, version A* with constant speed



Р и с. 5. Маршрут Майами — Дакар: распределение скоростей на маршруте для двух вариантов алгоритма
F i g. 5. Route Miami — Dakar: Route Speed Allocation for Two Variants of Algorithm





Р и с. 6. Выбор скорости хода на участке маршрута при трехмерном поиске с помощью A^*
 Fig. 6. Speed Choice in 3D Search by A^*

Т а б л и ц а 4. Планирование маршрута с заданным временем прибытия
 T a b l e 4. Planning the route with a predetermined arrival time

Маршрут	Заданная длительность, часов	При фиксированной скорости			При изменяемой скорости		
		Длительность, часов	Расход топлива, ед.,	Кол-во проверок	Длительность, часов	Расход топлива, ед.,	Кол-во проверок
I	120	119.9	387.6	26076	122.3	343.6	31047
	140	139.9	369.8	26076	142.2	259.7	551985
	160	160.1	116.4	26076	160.9	105.9	100936
	180	179.3	71.3	26076	180.3	68.5	52606
II	300	301.1	525.7	89021	302.1	493.8	38430
	320	312.5	432.2	89021	321.3	368.7	767710
	340	353.8	421.7	89021	341.9	347.8	892103

Заклучение

Основной целью данной работы являлась оценка возможностей версии алгоритма A^* с изменением скорости хода на этапе нахождения допустимых маршрутов. Будучи наиболее быстрым из всех рассмотренных ранее в [8] алгоритмов поиска допустимых маршрутов вариант A^* с постоянной скоростью хода был модифицирован для работы с варьируемой скоростью хода. При этом были рассмотрены два варианта дискретизации времени на маршруте: неявная, возникающая при выборе дискретного набора значений скорости хода и явная, при которой выбор временных отметок определяет возможную скорость хода на участке маршрута. Результаты, полученные при расчете нескольких маршрутов, свидетельствуют, что данные модификации могут обеспечивать лучшее

качество построенных маршрутов при соблюдении некоторых ограничений на шаг дискретности по времени. Существенным недостатком модифицированного варианта являются высокие вычислительные затраты. Также модифицированная версия алгоритма использует дополнительное множество параметров, которые необходимо настраивать для достижения результатов, сравнимых по качеству с вариантом с фиксированной скоростью. Выбор фиксированного набора значений скорости хода существенным образом влияет на возможности этой версии алгоритма по поиску допустимых решений.

Для многокритериальной постановки задачи о планировании маршрута, оптимального в смысле расхода топлива при фиксированном времени прибытия, была выявлена необходимость в проведении дальнейших исследований по выбору функции стоимости.



References

- [1] Walther L., Rizvanolli A., Wendebourg M., Jahn C. Modeling and Optimization Algorithms in Ship Weather Routing. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*. 2016; 4:31-45. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.004>
- [2] Topaj A.G., Tarovik O.V., Bakharev A.A., Kondratenko A.A. Optimal ice routing of a ship with icebreaker assistance. *Applied Ocean Research*. 2019; 86:177-187. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.02.021>
- [3] Pennino S., Gaglione S., Innac A., Piscopo V., Scamardella A. Development of a New Ship Adaptive Weather Routing Model Based on Seakeeping Analysis and Optimization. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020; 8(4):270. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse8040270>
- [4] Szłapczyńska J., Smierzchalski R. Multicriteria Optimisation in Weather Routing. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2009; 3(4):393-400. Available at: https://www.transnav.eu/Article_Multicriteria_Optimisation_in_Weather_Routing_Szłapczyńska,12,183.html (accessed 26.04.2021). (In Eng.)
- [5] Sotnikova M.V., Veremey E.I., Korovkin M.V. Transoceanic routes optimization using dynamic properties of ship and weather conditions. *2017 Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (dedicated to the memory of V.F. Demyanov) (CNSA)*. IEEE Press, St. Petersburg, Russia; 2017. p. 1-4. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/CNSA.2017.7974017>
- [6] Nocedal J., Wright S.J. Numerical Optimization. *Springer Series in Operations Research and Financial Engineering*. Second Edition. Springer, New York, NY; 2006. 664 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-40065-5>
- [7] Bekker J.F., Schmid J.P. Planning the safe transit of a ship through a mapped minefield. *ORiON*. 2006; 22(1):1-18. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5784/22-1-30>
- [8] Korovkin M., Pogozhev S. Improving the performance of weather routing algorithms. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2019; 187:57-64. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2495/MT190061>
- [9] Sotnikova M.V., Veremey E.I. Algorithms for Motion Optimization on a Given Trajectory Taking into Account Weather Forecast and Constraints. *IFAC-PapersOnLine*. 2018; 51(32):389-394. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.415>
- [10] Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. 1968; 4(2):100-107. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136>
- [11] Avgouleas K., Sclavounos P.D. Fuel-Efficient Ship Routing. *NAUSIVIOS CHORA*. 2014; 5:C-39. Available at: <https://nausivios.hna.gr/docs/2014C.pdf> (accessed 26.04.2021). (In Eng.)
- [12] Ming-Cheng Tsou, Hung-Chih Cheng. An Ant Colony Algorithm for efficient ship routing. *Polish Maritime Research*. 2013; 20(3):28-38. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2013-0032>
- [13] Padhy C.P., Sen D., Bhaskaran P.K. Application of wave model for weather routing of ships in the North Indian Ocean. *Natural Hazards*. 2008; 44(3):373-385. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9126-1>
- [14] Szłapczyńska J. Multi-objective Weather Routing with Customised Criteria and Constraints. *Journal of Navigation*. 2015; 68(2):338-354. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1017/S0373463314000691>
- [15] Wei S., Zhou P. Development of a 3D Dynamic Programming Method for Weather Routing. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2012; 6(1):79-85. Available at: https://www.transnav.eu/Article_Development_of_a_3D_Dynamic_Programming_Wei,21,337.html (accessed 26.04.2021). (In Eng.)
- [16] Bijlsma S.J. A Computational Method for the Solution of Optimal Control Problems in Ship Routing. *NAVIGATION. Journal of The Institute of Navigation*. 2001; 48(3):145-154. (In Eng.)
- [17] Fletcher R. Practical Methods of Optimization. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc.; 2000. 456 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118723203>
- [18] Fang M.-C., Lin Y.-H. The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements (II): Optimized routings. *Applied Ocean Research*. 2015; 50:130-140. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2014.12.005>
- [19] Lin Y.-H., Fang M.-C., Yeung R. The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements. *Applied Ocean Research*. 2013; 43:184-194. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.07.010>
- [20] Tsou M. Integration of a Geographic Information System and Evolutionary Computation for Automatic Routing in Coastal Navigation. *Journal of Navigation*. 2010; 63(2):323-341. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1017/S0373463309990385>
- [21] Li X., Wang H., Wu Q. Multi-objective optimization in ship weather routing. *2017 Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (dedicated to the memory of V.F. Demyanov) (CNSA)*. IEEE Press, St. Petersburg, Russia; 2017. pp. 1-4. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/CNSA.2017.7973982>
- [22] Shen Z., Wang H., Liu H. An improved A* algorithm for fuel-efficient ship weather routing. *2017 Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (dedicated to the memory of V.F. Demyanov) (CNSA)*. IEEE Press, St. Petersburg, Russia; 2017. p. 1-3. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/CNSA.2017.7973983>
- [23] Panigrahi J.K., Misra S.K., Umesh P.A. Application of Oceansat-1 MSMR analysed winds to marine navigation. *International Journal of Remote Sensing*. 2010; 31(10):2623-2637. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160903032919>
- [24] Hayashi M., Ishida H. Characteristics Analysis of Weather Routing by Practical Navigators. *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. IEEE Press, Taipei, Taiwan; 2006. p. 786-790. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2006.384483>



- [25] Vettor R., Soares C.G. Development of a ship weather routing system. *Ocean Engineering*. 2016; 123:1-14. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.06.035>

*Поступила 26.04.2021; одобрена после рецензирования 05.06.2021; принята к публикации 14.06.2021.
Submitted 26.04.2021; approved after reviewing 05.06.2021; accepted for publication 14.06.2021.*

Об авторах:

Коровкин Максим Васильевич, доцент кафедры компьютерных технологий и систем, факультет прикладной математики – процессов управления, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (199034, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9), кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2950-4048>, m.korovkin@spbu.ru

Погожев Сергей Владимирович, доцент кафедры компьютерных технологий и систем, факультет прикладной математики – процессов управления, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (199034, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9), кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0542-107X>, s.pogozhev@spbu.ru

Сотникова Маргарита Викторовна, профессор кафедры компьютерных технологий и систем, факультет прикладной математики – процессов управления, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (199034, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9), доктор физико-математических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0726-7448>, m.sotnikova@spbu.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the authors:

Maksim V. Korovkin, Associate Professor of the Department of Computer Applications and Systems, Faculty of Applied Mathematics and Control Processes, Saint-Petersburg State University (7/9 Universitetskaya Emb., St Petersburg 199034, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2950-4048>, m.korovkin@spbu.ru

Sergei V. Pogozhev, Associate Professor of the Department of Computer Applications and Systems, Faculty of Applied Mathematics and Control Processes, Saint-Petersburg State University (7/9 Universitetskaya Emb., St Petersburg 199034, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0542-107X>, s.pogozhev@spbu.ru

Margarita V. Sotnikova, Professor of the Department of Computer Applications and Systems, Faculty of Applied Mathematics and Control Processes, Saint-Petersburg State University (7/9 Universitetskaya Emb., St Petersburg 199034, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0726-7448>, m.sotnikova@spbu.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

