

УДК 004.8

В.М. Гриняк¹

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
Владивосток, Россия

Т.М. Гриняк²

ООО «Тера-Рекон»
Токио, Япония

Д.А. Акмайкин³

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
Владивосток, Россия

Планирование маршрута перехода морского судна с учетом параметров волнения

Статья посвящена проблеме обеспечения безопасного движения судов на морских акваториях. Особое место в рамках этой проблемы занимает задача планирования пути: траектории движения судна на локальной акватории и маршрута перехода от порта отправления к порту назначения. Целью планирования траектории судна на локальной акватории является обеспечение навигационной безопасности в условиях коллективного движения и географических особенностей акватории. Основная задача планирования маршрута перехода - оптимизация движения с различными критериями: кратчайший путь, кратчайшее время, минимальный расход топлива и т.п. В предлагаемой статье рассматривается задача планирования маршрута перехода с учётом опасности, которую представляет морское волнение при его воздействии на суда основных классов. В основу математической модели задачи положена интегральная оценка степени воздействия морского волнения на судно по пути следования судна к месту назначения. Ставится задача минимизации этого воздействия. При этом метрикой, характеризующей степень опасности морского волнения, выступают известные отраслевые представления, описываемые диаграммой штормования судна на попутном волнении.

¹ Гриняк Виктор Михайлович – д-р техн. наук, профессор кафедры информационных технологий и систем, e-mail: Viktor.Grinyak@vvsu.ru

² Гриняк Тимофей Михайлович – инженер-программист ООО Тера-Рекон, Токио, Япония, e-mail: tgrinyak@gmail.com

³ Акмайкин Денис Александрович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры судовождения Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, e-mail: akmaykin@gmail.com

С целью сокращения вычислительной сложности до приемлемых значений исходная оптимизационная задача сводится к задаче поиска кратчайшего пути на взвешенном графе. Рассматриваются способы разбиения участка поверхности акватории вершинами графа, определения множества рёбер графа и поиска кортежа вершин, обеспечивающего кратчайший путь на заданном графе с учётом принятой метрики.

Приведены результаты расчётов маршрутов перехода в водах Японского моря в условиях штормовой погоды на основе реальных данных о параметрах морского волнения. Показано, что предложенный способ нахождения безопасных маршрутов позволяет сформировать систематизированное представление о степени потенциальной опасности, «поджидающей» судоводителя по пути следования судна к точке назначения.

Ключевые слова и словосочетания: безопасность судоходства, морское волнение, траектория движения, диаграмма штормования, кратчайший путь.

V.M. Grinyak

Vladivostok State University of Economics and Service.
Vladivostok, Russia

T.M. Grinyak

JSC TeraRecon inc.
Tokyo, Japan

D.A. Akmaykin

Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi
Vladivostok, Russia

Ships route planning with respect of sea wave properties

The paper is devoted to the problem of marine safety. A special place in this problem is the task of planning the way: the trajectory of the vessel's movement on the local water area and the route from port of departure to the port of destination. The purpose of planning the trajectory of the vessel on the local water area is to ensure navigation security in conditions of collective movement and geographical features of the water area. The main task of planning the transition route is to optimize traffic with various criteria: shortest path, shortest time, minimum fuel consumption, etc. The proposed article deals with the problem of planning the route of the transition, taking into account the danger posed by sea waves when it affects the vessels of the main classes.

The mathematical model of the problem is based on an integral assessment of the degree of impact of sea waves on the vessel along the route of the ship to the destination. The task is to minimize this impact. At the same time, the metric characterizing the degree of danger of sea waves is known industry representations, described by the diagram of the ship's storm on the accompanying waves. In order to reduce computational complexity to acceptable values, the initial optimization problem reduces to the problem of finding the shortest path on a weighted graph. In this paper, we consider methods of partitioning a portion of the surface of an aquatorium by the vertices of a graph, determining the set of edges of a graph, and searching for a vertex tuple that provides the shortest path on a given graph taking into account the accepted metric.

The article is accompanied by the results of calculations of the migration routes in the waters of the Japan Sea in stormy weather conditions on the basis of real data on the parameters of sea waves. It is shown that the proposed method of finding safe routes allows to form a systematized view of the degree of potential danger "waiting for" the ship along the way to the destination.

Keywords: marine safety, sea waves, path planning, storm diagram, shortest path..

Введение

Обеспечение безопасности движения морского судна – актуальная, сложная и многоаспектная проблема, постоянно привлекающая внимание исследователей [1–5].

В рамках этой проблемы выделяются задачи планирования пути: траектории движения судна на локальной акватории и маршрута перехода от порта отправления к порту назначения. Целью планирования траектории судна на локальной акватории является обеспечение навигационной безопасности в условиях коллективного движения [6–8]. Основная задача планирования маршрута перехода – оптимизация движения, например, плавание по кратчайшему из возможных путей, за кратчайшее время, с минимальным расходом топлива и т.п. [9–11].

Погодные условия по пути следования судна существенно влияют на выбор его маршрута, так как характер движения в штормовых условиях коренным образом отличается от такового в спокойную погоду [12–14]. Определение параметров волнения, при которых его неблагоприятное влияние становится опасным, и прокладка маршрута в обход опасных участков – важные составляющие работы судоводителя. Перспективным здесь является использование информации, предоставляемой специальными метеосервисами по данным спутникового мониторинга [15; 16]. Комплексирование данных нескольких метеоспутников способно дать достаточно адекватную картину текущих и прогнозируемых погодных условий [17].

В настоящей работе рассматривается задача планирования маршрута перехода с учётом информации о параметрах морского волнения – высоте и длине волны. Математическая модель задачи основана на поиске кратчайшего пути на взвешенном графе и отраслевых представлениях об оценке безопасности плавания, выраженных диаграммами штормового плавания судна [18]. Результаты решения задачи позволяют выбирать маршрут перехода судна, обеспечивающий безопасное движение.

Основные модельные представления

Оценка воздействия морского волнения на движущееся судно представляет собой сложную задачу, решение которой основано на комплексировании фундаментальных теоретических и эмпирических представлений. Основными параметрами морского волнения, учитываемыми при такой оценке, являются высота h и длина λ волн, направление и скорость их распространения, длина судна L , курс и скорость его движения.

Многолетний судоводительский опыт позволил установить опасные и безопасные сочетания параметров морского волнения для основных классов морских судов [18; 19]. Так, отношение длины волны к длине судна $\frac{\lambda}{L} \in [0.7 \div 1.3]$ считается неблагоприятным, а при определённых (зависящих от размеров судна) зна-

чениях высоты волн – опасным. На рис. 1 показаны области отношений длины волны к длине судна и средней высоты волны $h_{\text{сред}}$ к расчётной высоте волны $h_{\text{расч}} = 0.22L^{0.175}$, при которых неблагоприятное влияние попутных волн на судно считается заметным. Внутреннему многоугольнику соответствует область наиболее опасных для судна волн; степень опасности возрастает по мере приближения отношения $\frac{\lambda}{L}$ к 1 и увеличения высоты волны. При плавании в таких условиях требуется тщательный выбор безопасных скоростей и курсов судна. Внешний многоугольник соответствует неблагоприятным значениям параметров волнения; в этом случае следует оценивать его безопасность по основным и дополнительным диаграммам штормового плавания [18, 19].

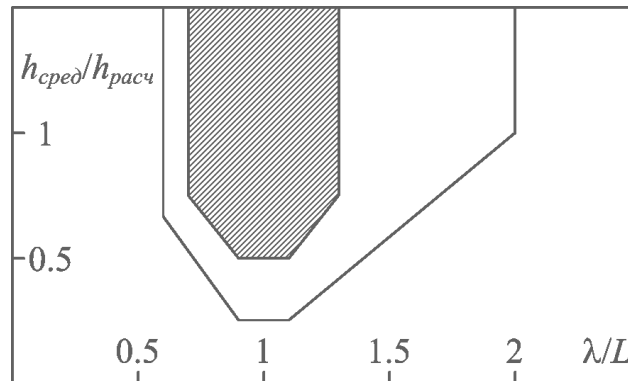


Рис. 1. Диаграмма штормования на попутном волнении

Рассмотрим систему координат xu , где ось абсцисс x соответствует географической долготе, а ось ординат y – географической широте судна. Пусть каждой точке акватории с координатами x, y соответствует уровень опасности волнения $u(x, y)$. Тогда при следовании судна по траектории, задаваемой кривой q , оно подвергнется воздействию волн, описываемому криволинейным интегралом первого рода:

$$U = \int_q u(x, y) dq. \quad (1)$$

Для вычисления этого интеграла его удобнее представить в виде

$$U = \int_q u(x, y) dq = \int_{t_1}^{t_2} u(x, y) \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} dt, \quad (2)$$

где $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ и $\dot{y} = \frac{dy}{dt}$ – скорости изменения долготы и широты судна при его движении, зависящие, в свою очередь, от координат, курса и скорости судна; t_1 и t_2 – время начала и окончания движения судна по кривой q .

Примем, что оптимальной траекторией движения судна из множества возможных является кривая $q(t)$, обеспечивающая минимум функционала U , так что

$$q(t) = \arg \min_q (U(q)). \quad (3)$$

Решение уравнения (3) при заданной функции $u(x, y)$ и краевых значениях кривой $q(t_1)$ и $q(t_2)$ может быть найдено различными способами, как аналитически – методами уравнений математической физики, так и различными численными методами – решениями дифференциальных уравнений в частных производных. Первый подход возможен лишь при самых простых видах функции $u(x, y)$, а второй, хоть и позволит вычислить оптимальное решение, характеризуется высокой вычислительной сложностью, что делает его малоприменимым для практики. Задача (3) может быть сведена к методам вариационного исчисления или динамического программирования [14], которые в рассматриваемом случае также будут чрезмерно сложны. Поэтому в настоящей работе предлагается интерпретировать задачу планирования маршрута как поиск кратчайшего пути на взвешенном графе. Этот приём хорошо зарекомендовал себя в задачах судовождения [20–23].

Рассмотрим множество из N точек p_i с координатами x_i, y_i . При этом одна из точек (p_1) соответствует точке начала движения судна, и одна из точек (p_N) – конечной точке маршрута. Вес ребра графа d_{ij} , соединяющего точки p_i и p_j соответствует функционалу (1) в предположении о прямолинейном движении. Для близко расположенных точек на практике вес ребра удобно задавать следующим образом:

$$d_{ij} = \frac{u(x_i, y_i) + u(x_j, y_j)}{2} r(p_i, p_j), \quad (4)$$

где $r(p_i, p_j)$ – расстояние между точками p_i и p_j по дуге большого круга (конкретный вид функции зависит от принятой модели поверхности Земли).

Таким образом, может быть поставлена задача разбиения участка поверхности вершинами графа, определения множества рёбер графа и поиска кортежа вершин $\{p_1, \dots, p_N\}$, обеспечивающего кратчайший путь на заданном графе с учётом принятой метрики d_{ij} .

Разбиение вершинами графа. Предположим, что множество возможных маршрутов судна лежит на плоскости xu внутри квадрата со стороной, равной длине отрезка с вершинами в начальной и конечной точках маршрута (p_1 и p_N соответственно). При этом точка p_1 лежит в середине стороны квадрата, а точка p_N – в середине противоположной стороны (то есть отрезок $p_1 p_N$ делит квадрат пополам). Заполним этот квадрат точками так, чтобы они образовывали правильную прямоугольную сетку. Пусть n – число точек, разбивающих при этом отрезок $p_1 p_N$, а m – число рядов точек справа и слева от этого отрезка. Тогда $nm + n$ – число точек, лежащих внутри квадрата, а общее число вершин графа с учётом начала и конца маршрута равно $nm + n + 2$.

Определение множества рёбер графа. Простейшим случаем множества рёбер графа является случай, когда все вершины соединяются друг с другом, получая таким образом $\frac{(nm + n + 2)(nm + n + 1)}{2}$ рёбер. Вместе с тем для протяжённых маршрутов, где n – велико, это приводит к неоправданному росту времени поиска кратчайшего пути. Существенно уменьшить число рёбер можно с учётом специфики судоводительской практики. Назовём вершины графа, лежащие на отрезках, перпендикулярных отрезку $p_1 p_N$, слоями вершин. Положим, что при

движении судна возможны переходы только от одного слоя вершин к следующему ближайшему слою, а движения между вершинами одного слоя или между вершинами далеко отстоящих слоёв запрещены. С учетом того, что имеются n слоёв по $m + 1$ вершин в каждом, а также вершины начала и конца, число рёбер станет равным $(n - 1)(m + 1)^2 + 2(m + 1)$.

Поиск кратчайшего пути на графе. Особенностью рассматриваемой задачи является наличие запрещённых для плавания путей, обусловленных географией района. В том случае, если одна из вершин либо часть инцидентного им ребра попадает на запрещённый участок (например, на сушу), вес ребра принимается равным бесконечности. В остальных случаях вес рёбер графа задаётся согласно метрике (4), при этом полученный граф считается неориентированным. Поиск кратчайшего пути от вершины p_1 до вершин p_N может быть проведён любым известным алгоритмом общего назначения (Дейкстры, Беллмана-Форда и др.). Выбор значений m и n во многом зависит от географических особенностей района и масштаба неоднородностей данных о параметрах морского волнения. При этом следует иметь в виду, что сложность наиболее эффективных алгоритмов поиска пути на графах пропорциональна числу рёбер и числу вершин (или их логарифму) [24] и нужно ограничивать значения m и n так, чтобы время решения задачи оставалось приемлемым для практики.

Результаты натурных исследований

Ниже приведены результаты расчётов, сделанных по данным о морском волнении в районе Японского моря. Данные были получены по результатам спутникового мониторинга. Уровень опасности волнения $u(x, y)$ задавался при этом согласно диаграмме рис. 1 следующим образом. Если точка лежит во внутреннем многоугольнике рис. 1, то $u = 10$ (высокая опасность); если точка лежит за пределами внешнего многоугольника рис. 1, то $u = 1$ (безопасное волнение); если точка лежит во внешнем многоугольнике рис. 1, то u принимает значения в диапазоне от 1 до 10 пропорционально расстояниям до границ внешнего и внутреннего многоугольников. Поиск кратчайшего пути на графе осуществлялся алгоритмом Дейкстры.

На рис. 2 показаны результаты расчётов наиболее безопасного маршрута для судна длины 70 м., движущегося от Цусимского пролива до пролива Лаперуза по метеоданным на 23 января 2018 года. На рис. 2а приведены значения средней высоты волн, а на рис. 2б – соответствующие диаграмме рис. 1 уровни опасности попутного морского волнения. Приведены также результаты расчётов маршрута, обеспечивающего минимум функционала (3) при разбиении вершинами графа для $n = 30$, $m = 40$ (линия с точками). Средняя высота волн в середине моря достигает 4–6 метров (рис. 2а). Значительная часть акватории характеризуется высоким уровнем опасности – 10 единиц (рис. 2б). Видно, что характер волнения делает возможным относительно безопасное движение судна в основном вдоль побережья. При этом безопасный маршрут существенно отличается от кратчайшего, проходящего через район с высокой степенью опасности.

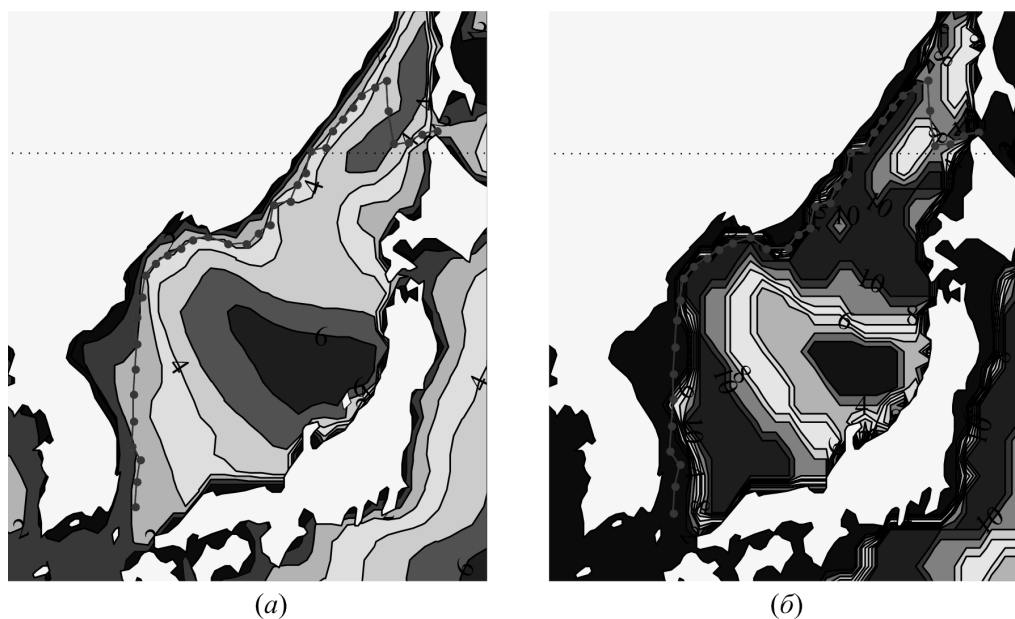


Рис. 2. Результаты расчёта наиболее безопасного маршрута для судна длиной 70 м:
(а) – на фоне данных о высоте волн, (б) – на фоне значений уровня опасности

На рисунке 3 показаны аналогичные результаты расчётов наиболее безопасного маршрута для судна длины 100 метров. Видно, что судно длиной 100 метров не имеет возможности обойти зону опасного волнения и ему придётся проходить опасный участок (рис. 3). Во всех случаях (70 и 100 метров) суда должны будут обойти опасную зону западнее, вдоль побережья Кореи и Приморья.

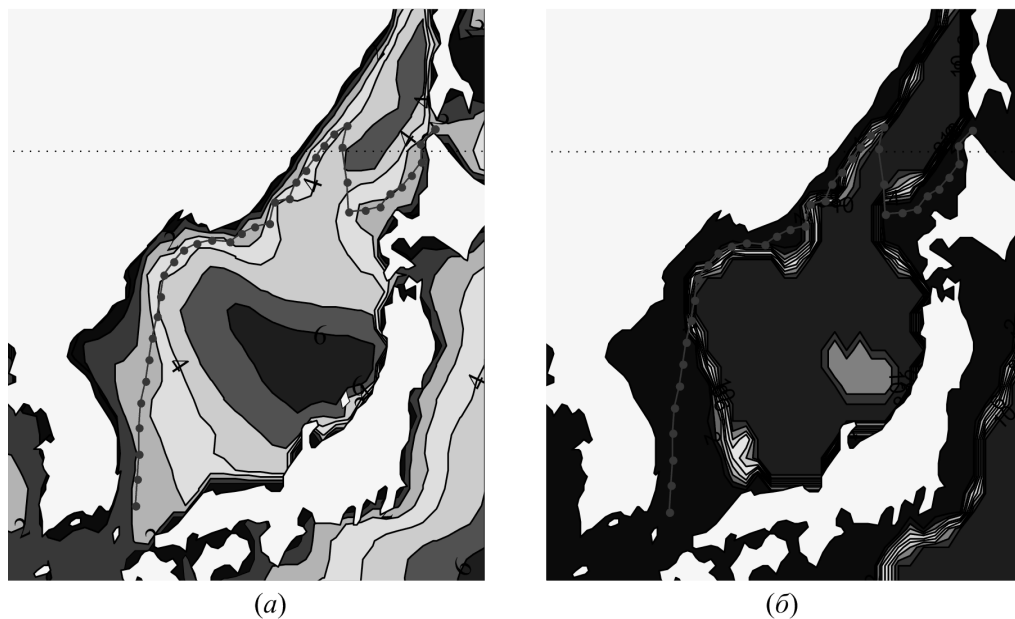


Рис. 3. Результаты расчёта наиболее безопасного маршрута для судна длиной 100 метров: (а) – на фоне данных о высоте волн, (б) – на фоне значений уровня опасности

Переход судна от начальной до конечной точки маршрута может занимать значительное время, за которое метеобстановка способна существенно измениться. Если для рассматриваемого района характерно быстрое движение циклонов и атмосферных фронтов, это может делать недостоверными расчёты маршрута на большой период времени. Имея это в виду, на практике задача выбора безопасного маршрута должна решаться итерационно, с проведением очередных расчётов по мере поступления новых метеоданных.

В рассмотренном примере время перехода от Цусимского пролива до пролива Лаперуза может занять более 2 суток. Положим, что судно движется по рассчитанному маршруту в течение одних суток, за это время выходит в район порта Находка и снова рассчитывает безопасный маршрут на основе обновлённых данных о погоде. На рисунках 4 и 5 приведены результаты расчётов наиболее безопасного маршрута по метеоданным на 24 января 2018 года (то есть спустя сутки) при движении от достигнутой за сутки точки в районе порта Находка до пролива Лаперуза. Как и в случае рис. 2, 3 длина судна принята равной 70 и 100 метров, разбиение вершинами графа сделано для $n = 30$, $m = 40$. Видно, что области с опасной волной за сутки несколько изменили свои очертания и местоположение. В частности, для судов длиной 70 метров безопасный маршрут требует продолжительного «обхода» опасной зоны с севера (рис. 4б); для судов длиной 100 метров вход в пролив Лаперуза оказался практически «запертым» опасной зоной (рис. 5б). Возможно, на практике судоводителю следует отказаться от плавания по рассчитанному маршруту и подождать наступления более благоприятных погодных условий.

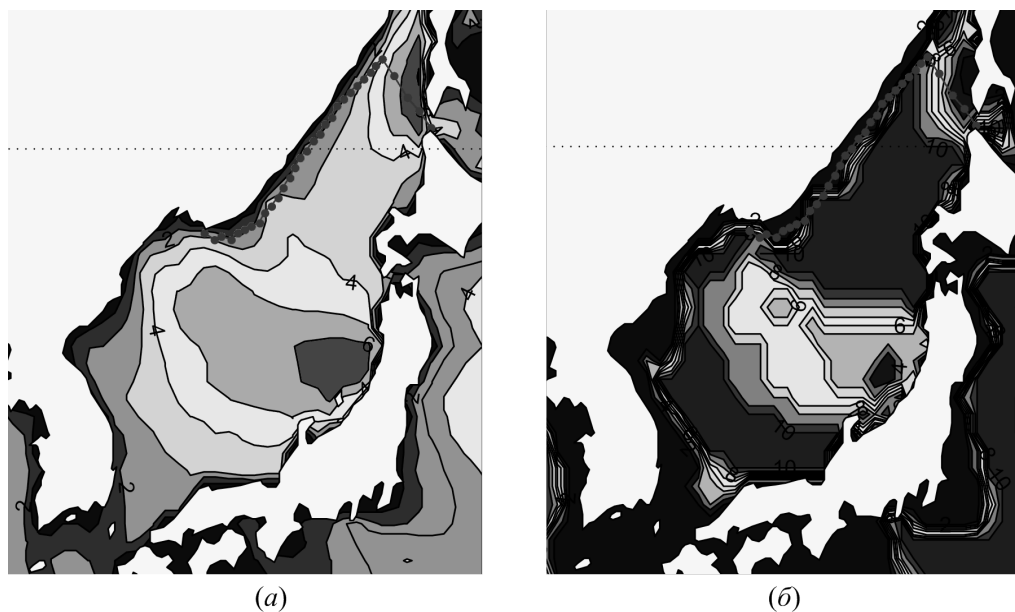


Рис. 4. Результаты расчёта наиболее безопасного маршрута для судна длиной 70 метров спустя сутки: (а) – на фоне данных о высоте волн, (б) – на фоне значений уровня опасности

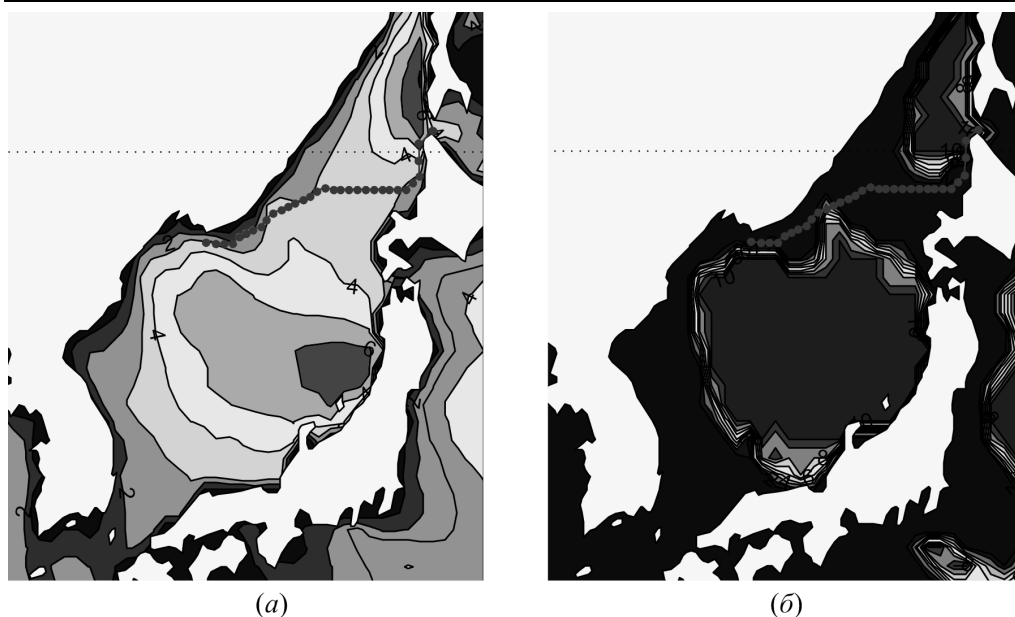


Рис. 5. Результаты расчёта наиболее безопасного маршрута для судна длиной 100 м спустя сутки: (а) – на фоне данных о высоте волн, (б) – на фоне значений уровня опасности

Предложенный способ нахождения безопасных маршрутов позволяет сформировать систематизированное представление о степени потенциальной опасности, «поджидающей» судоводителя по пути следования судна к точке назначения. Сам по себе подход, связанный с решением оптимизационной задачи при выборе маршрута перехода судна, хорошо известен. Так, в работе [10] предложен метод, позволяющий определять оптимальный маршрут движения судна с учётом розы ветров и течений. Приводятся примеры построения маршрута перехода за наименьшее время или с наименьшим расходом топлива с использованием реальных данных. Указывается, что с учётом неоднородности движения среды такие оптимальные маршруты существенно отличаются от проходящих по дуге большого круга. Вместе с тем этот метод (как и многие другие [9]) не учитывает наличия «запрещённых» по соображениям безопасности участков и курсов движения.

Определённую проблему представляет высокая вычислительная сложность задачи поиска кратчайшего пути на графах при использовании точных алгоритмов. И здесь перспективным является обращение к алгоритмам эвристического типа. Так, в работе [11] для поиска оптимальных по времени и экономике маршрутов авторы предлагают использовать генетический алгоритм, в работе [14] – формировать множество допустимых траекторий, лежащих «справа» и «слева» от дуги большого круга, в [21] также предлагается использовать генетический алгоритм. При большой размерности графа определённые перспективы открывает также использование муравьиных алгоритмов [6]. Возможно также использовать подход, связанный с уменьшением числа вершин, «участвующих» в поиске кратчайшего пути [25]. Несмотря на то, что все эти приближённые методы в общем случае способны дать не точное, а лишь близкое к нему решение, в рассматриваемой задаче подобный подход оправдан: из-за динамически меняющейся

метеобстановки даже точные алгоритмы поиска пути будут находить лишь «кусочно-статическое» оптимальное решение, которое, конечно же, не будет являться оптимальным, в строгом смысле, решением динамической задачи.

В настоящей работе рассмотрена функция опасности $u(x, y)$ на основе диаграммы штормования на попутном волнении (рис. 1). Отметим, что возможны и другие метрики опасности метеобстановки [12].

Имеющиеся в распоряжении судоводителей метеоданные не всегда несут в себе информацию о длине волны. В этом случае можно прибегнуть к эмпирическим формулам её расчёта на основе данных о высоте волн, скорости ветра и т.п. [26–28].

Заключение

Планирование маршрута перехода морского судна часто связано с решением оптимизационной задачи. В качестве критерия оптимальности могут выступать расстояние, время перехода, экономические показатели (расход топлива). В настоящей работе предложен критерий безопасности перехода, основанный на представлениях о воздействии на судно попутного морского волнения.

Оптимизация маршрута перехода на основе реальных данных представляет собой задачу высокой вычислительной сложности. В статье предлагается модельная интерпретация задачи как задачи поиска кратчайшего пути на взвешенном графе. Рассмотрен способ разбиения акватории вершинами графа и определения множества рёбер графа, отражающий отраслевые представления о прокладке маршрута и уменьшающий вычислительную сложность задачи.

Проведённые исследования на основе реальных данных о параметрах морского волнения подтвердили перспективность применения предложенного подхода. В качестве примера рассмотрен случай вычисления безопасного маршрута перехода через Японское море для судов различного размера. Приведённые результаты расчётов способны дать адекватную картину опасных участков акваторий и служить основой для принятия решений судоводителями.

1. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Иваненко Ю.С. Оценка опасности движения на акватории по данным автоматической идентификационной системы // Транспорт: наука, техника, управление. 2017. №10. С. 41–46.
2. Гриняк В.М. Многоуровневая модель оценки безопасности движения морских судов в ограниченных водах // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2015. №2. С. 120–129.
3. Мальгин И.Г., Комашинский В.И., Королев О.А. Информационно-управляющие системы водного транспорта в период четвертой индустриальной революции // Транспорт: наука, техника, управление. 2017. №8. С. 3–12.
4. Некрасов С.Н. Метод количественной оценки навигационной безопасности плавания // Навигация и гидрография. 2017. №48. С. 7–17.
5. Седова Н.А., Седов В.А., Левченко Н.Г. Оценка степени опасности наблюдаемой цели на море с использованием систем искусственного интеллекта // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №4. Т. 3. С. 106–114.
6. Lazarowska A. Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony optimisation // Journal of Navigation. 2015. Vol. 68. Is. 2. Pp. 291–307.
7. Вишневецкий С.А. Использование метода полей потенциалов для локального планировщика маршрута судна // Эксплуатация морского транспорта. 2016. №3. С. 37–43.
8. Лебедева М.П., Айзинов С.Д., Лебедев А.О. Методика оценки безопасного движения судов в стесненной акватории // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 1. С. 111–120.

9. Lu R., Turan O., Boulougouris E., Banks C., Incecik A. A semi-empirical ship operational performance prediction model for voyage optimization towards energy efficient shipping // *Ocean Engineering*. – 2015. – Vol. 110. – Pp. 18–28.
10. Lin Y.-H., Fang M.-C., Yeung R. W. The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements // *Applied Ocean Research*. 2013. Vol. 43. Pp. 184–194.
11. Wang, H., Li, X., Li, P., Veremey, E., Sotnikova, M. Application of Real-Coded Genetic Algorithm in Ship Weather Routing // *Journal of Navigation*. 2018. Vol. 71. Is. 4. Pp. 989–1010.
12. Формирование модели экспертной системы оценки безопасности движения судна / Д.А. Акмайкин, С.Ф. Ключева, А.Д. Москаленко, М.А. Москаленко // *Транспортное дело России*. 2015. №121. С. 203–207.
13. Акмайкин Д.А., Ключева С.Ф., Салюк П.А. Проект системы оперативного анализа и оптимизации движения морских судов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2015. № 1. Т. 29. С. 229–232.
14. Сотникова М.В. Алгоритмы формирования маршрутов движения судов с учетом прогноза погодных условий // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2009. №2.
15. Ocean Surface Topography Mission/Jason-2. URL: http://www.nasa.gov/mision_pages/ostm/main/#.V-ebOyiLSU1. (01.08.2018).
16. OSTM/Jason-2 Products Handbook / J.P. Dumont [etc.], 2001. 72 с.
17. Акмайкин Д.А., Букин О.А., Гриняк В.М. Комплексное использование данных метеоспутников для измерения параметров ветра и волнения вдоль маршрута судна // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2017. Т. 9. № 5. С. 941–953.
18. Выбор безопасных скоростей и курсовых углов при штормовом плавании судна на попутном волнении: РД 31.00.57.2.-91 – Утв. М-вом транспорта Российской Федерации 22.02.93; введ. в действие с 01.09.93. – СПб.: ЦНИИМФ, 2002. 59 с. №РД 31.00.57.2.-91.
19. Справочник по теории корабля: в 3 т. Т. 2: Статика судов. Качка судов / под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. 440 с.
20. Чертков А.А. Автоматизация выбора кратчайших маршрутов судов на основе модифицированного алгоритма Беллмана-Форда // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2017. Т.9. №5. С. 1113–1122.
21. Федоренко К.В., Оловянных А.Л. Исследование основных параметров генетического алгоритма применительно к задаче поиска оптимального маршрута // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2017. Т. 9. № 4. С. 714–723.
22. Чертков А. А., Вардомская А.А., Дмитриев А.А. Автоматизация определения критического пути в логистической системе // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2015. №5. Т.33. С. 194–200.
23. Акмайкин Д.А., Ключева С.Ф., Салюк П.А. Результаты исследований проблемы моделирования графа маршрута судна на основе алгоритмов кластеризации // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2016. №5. С. 29–38.
24. Касьянов В.Н., Евстигнеев В.А. Графы в программировании: визуализация и применение. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 104 с.
25. Акмайкин Д.А., Ключева С.Ф., Салюк П.А. Эвристический поиск оптимального маршрута судна по северному морскому пути // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2015. №5. С. 55–62.

26. Глуховский Б.Х. Исследование морского ветрового волнения. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 284 с.
27. Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Чупина К.В. Системы управления глубиной буксируемых объектов. Владивосток: Дальнаука, 2005. 285 с.
28. Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Гриняк В.М. Определение гидродинамического сопротивления по траекторным данным инерционного движения объекта // Журнал технической физики. 2003. №2. С. 38–42.

Транслитерация

1. Grinjak V.M., Devjatisil'nyj A.S., Ivanenko Ju.S. Ocenka opasnosti dvizhenija na akvatorii po dannym avtomaticheskoy identifikacionnoj sistemy // Transport: nauka, tehnika, upravlenie. 2017. № 10. P. 41–46.
2. Grinjak V.M. Mnogourovnevaja model' ocenki bezopasnosti dvizhenija morskikh sudov v ogranichennyh vodah // Territorija novyh vozmozhnostej. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta jekonomiki i servisa. 2015. № 2. P. 120–129.
3. Malygin I.G., Komashinskij V.I., Korolev O.A. Informacionno-upravljajushhie sistemy vodnogo transporta v period chetvertoj industrial'noj revoljucii // Transport: nauka, tehnika, upravlenie. 2017. № 8. P. 3–12.
4. Nekrasov S.N. Metod kolichestvennoj ocenki navigacionnoj bezopasnosti plavanija // Navigacija i gidrografija. 2017. № 48. P. 7–17.
5. Sedova N.A., Sedov V.A., Levchenko N.G. Ocenka stepeni opasnosti nabljudajemoj celi na more s ispol'zovaniem sistem iskusstvennogo intellekta // Morskie intellektual'nye tehnologii. 2017. № 4. T. 3. P. 106–114.
6. Lazarowska A. Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony optimisation // Journal of Navigation. 2015. Vol. 68. Is. 2. Pp. 291–307.
7. Vishneveckij S.A. Ispol'zovanie metoda polej potencialov dlja lokal'nogo planirovshhika marshruta sudna // Jekspluatacija morskogo transporta. 2016. № 3. P. 37–43.
8. Lebedeva M.P., Ajzinov S.D., Lebedev A.O. Metodika ocenki bezopasnogo dvizhenija sudov v stesЕННОj akvatorii // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2017. T. 9. № 1. P. 111–120.
9. Lu R., Turan O., Boulougouris E., Banks C., Incecik A. A semi-empirical ship operational performance prediction model for voyage optimization towards energy efficient shipping // Ocean Engineering. 2015. Vol. 110. Pp. 18–28.
10. Lin Y.-H., Fang M.-C., Yeung R. W. The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements // Applied Ocean Research. 2013. Vol. 43. Pp. 184–194.
11. Wang, H., Li, X., Li, P., Veremey, E., Sotnikova, M. Application of Real-Coded Genetic Algorithm in Ship Weather Routing // Journal of Navigation. 2018. Vol. 71. Is. 4. Pp. 989–1010.
12. Formirovanie modeli jekspertnoj sistemy ocenki bezopasnosti dvizhenija sudna / D.A. Akmajkin, S.F. Kljueva, A.D. Moskalenko, M.A. Moskalenko // Transportnoe delo Rossii. 2015. № 121. P. 203–207.
13. Akmajkin D.A., Kljueva S.F., Saljuk P.A. Proekt sistemy operativnogo analiza i optimizacii dvizhenija morskikh sudov // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2015. № 1. T. 29. P. 229–232.
14. Sotnikova M.V. Algoritmy formirovanija marshrutov dvizhenija sudov s uchedom prognoza pogodnyh uslovij // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 10: Prikladnaja matematika. Informatika. Processy upravlenija. 2009. № 2.
15. Ocean Surface Topography Mission/Jason-2. URL: http://www.nasa.gov/mision_pages/ostm/main/#.V-ebOyiLSU1. (01.08.2018).
16. OSTM/Jason-2 Products Handbook / J.P. Dumont [etc.], 2001. 72 с.
17. Akmajkin D.A., Bukin O.A., Grinjak V.M. Kompleksnoe ispol'zovanie dannyh meteosputnikov dlja izmerenija parametrov vetra i volnenija vdol' marshruta sudna // Vestnik Gosu-

- darstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2017. T.9. № 5. P. 941–953.
18. Vybór bezopasnyh skorostej i kursovyh uglov pri shtormovom plavanii sudna na poputnom volnenii: RD 31.00.57.2.-91 – Utv. M-vom transporta Rossijskoj Federacii 22.02.93; vvod. v dejstvie s 01.09.93. – SPb.: CNIIMF, 2002. 59 s. №RD 31.00.57.2.-91.
 19. Spravochnik po teorii korablja: v 3 t. T. 2: Statika sudov. Kachka sudov / pod red. Ja.I. Vojtkunskogo. L.: Sudostroenie, 1985. 440 p.
 20. Chertkov A.A. Avtomatizacija vybora kratchajshih marshrutov sudov na osnove modifirovannogo algoritma Bellmana-Forda // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2017. T.9. №5. P. 1113–1122.
 21. Fedorenko K.V., Olovjannikov A.L. Issledovanie osnovnyh parametrov geneticheskogo algoritma primenitel'no k zadache poiska optimal'nogo marshruta // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2017. T. 9. № 4. P. 714–723.
 22. Chertkov A. A., Vardomskaia A.A., Dmitriev A.A. Avtomatizacija opredelenija kriticheskogo puti v logisticheskoi sisteme // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2015. № 5. T. 33. C. 194–200.
 23. Akmajkin D.A., Kljueva S.F., Saljuk P.A. Rezul'taty issledovanij problemy modelirovanija grafa marshruta sudna na osnove algoritmov klasterizacii // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2016. № 5. P. 29–38.
 24. Kas'janov V.N., Evstigneev V.A. Grafy v programmirovanii: vizualizacija i primenenie. SPb.: BHV-Peterburg, 2003. 104 P.
 25. Akmajkin D.A., Kljueva S.F., Saljuk P.A. Jevristicheskij poisk optimal'nogo marshruta sudna po severnomu morskomu puti // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2015. № 5. P. 55–62.
 26. Gluhovskij B.H. Issledovanie morskogo vetrovogo volnenija. L.: Gidrometeoizdat, 1966. 284 P.
 27. Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Chupina K.V. Sistemy upravlenija glubinoj buksiruemyh ob'ektov. Vladivostok: Dal'nauka, 2005. 285 p.
 28. Devjatisil'nyj A.S., Dorozhko V.M., Grinjak V.M. Opredelenie gidrodinamicheskogo soprotivlenija po traektornym dannym inercionnogo dvizhenija ob'ekta // Zhurnal tehnicheckoj fiziki. 2003. № 2. P. 38–42.

© В.М. Гриняк, 2018

© Т.М. Гриняк, 2018

© Д.А. Акмайкин, 2018

Для цитирования: Гриняк В.М., Гриняк Т.М., Акмайкин Д.А. Планирование маршрута перехода морского судна с учетом параметров волнения // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2018. Т. 10. № 4. С. 99–111.

For citation: Grinyak V.M., Grinyak T.M., Akmaykin D.A. Ships route planning with respect of sea wave properties // *The Territory of New Opportunites. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service*, 2018, Vol. 10, №4, pp. 99–111.

DOI dx.doi.org/10.24866/VVSU/2073-3984/2018-4/099-111

Дата поступления: 14.08.18