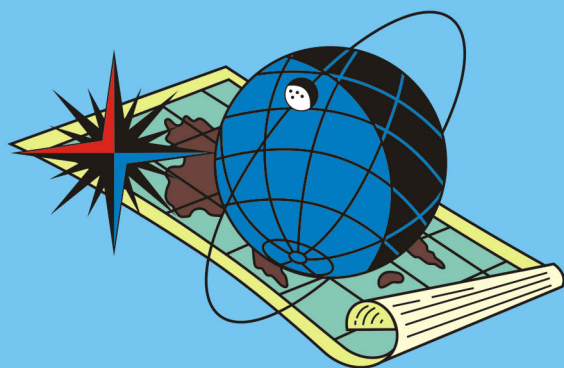


ISSN 2220-0983

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

№ 4 (77)
Декабрь 2024

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ



Санкт-Петербург

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

№ 4 (77)

Декабрь 2024

Издается с 1995 года

Санкт-Петербург

**Главный редактор
к. т. н. В. М. Смолин**

Редакционная коллегия:

к. т. н. А. А. Якушев (заместитель главного редактора);
д. т. н. П. И. Малеев (научный редактор); к. г.-м. н. И. Ю. Бугрова (редактор);
к. в. н. В. Ю. Бахмутов (ответственный за выпуск);
д. т. н., профессор Э. С. Зубченко; д. в. н., проф. А. И. Исмаилов;
д. в. н., проф. В. А. Катенин; д. т. н. С. И. Мастрюков;
акад. РАН В. Г. Пешехонов; д. т. н., профессор К. Г. Ставров;
д. т. н. А. М. Шарков; д. ф.-м. н., профессор Г. Г. Щукин

Журнал «Навигация и гидрография» включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»

Электронная версия журнала размещена на сайте www.gningi.ru

**© Акционерное общество
«Государственный научно-исследовательский
навигационно-гидрографический институт»
2024**

**THE STATE RESEARCH NAVIGATION-HYDROGRAPHIC
INSTITUTE**

NAVIGATION AND HYDROGRAPHY

No 4 (77) December 2024

Published since 1995

Saint-Petersburg

Editor-in-chief
V. Smolin, CandSc

Editorial board

A. Yakushev, CandSc (deputy editor-in-chief); P. Maleyev, DSc (science editor);
I. Bugrova (editor), CandSc; V. Bakhmutov (the issue manager), CandSc;
E. Zubchenko, DSc, professor; A. Ismailov, DSc, professor;
V. Katenin, DSc, professor; S. Mastryukov, DSc;
V. Peshekhonov, DSc, Acad. RAS; K. Stavrov, DSc, professor;
A. Sharkov, DSc; G. Shchukin, DSc, professor

© Joint Stock Company
«The State Research Navigation-Hydrographic Institute»
2024

СОДЕРЖАНИЕ

НАВИГАЦИЯ

К вопросу создания навигационной гидроакустической системы дальнего действия. К. А. Виноградов, О. А. Гасников, Ю. М. Репин, К. Г. Ставров	7
Имитационное моделирование трафика морской акватории для планирования безопасной схемы движения судов. В. М. Гриняк, А. В. Шуленина, И. В. Бабиев, А. В. Артемьев.....	15
Модель функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры сложных технических систем на основе логико-функционального описания взаимодействующих элементов с использованием сети Петри. А. И. Лоскутов, В. А. Клыков, А. В. Столяров, Ю. В. Перелыгин.	27
Тестирование глобального сервиса высокоточного определения координат Hi-RTPTM китайской компании Hi-Target. В. М. Смолин, С. В. Решетняк, Д. Ф. Миляков, О. Л. Онищенко..	40
О реализации Основ государственной политики в области военно-морской деятельности Российской Федерации до 2030 года. С. А. Пискун, А. М. Попов, А. В. Безгодов.....	75

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

К вопросу о методах и погрешностях расчёта скорости вертикального зондирования моря при эхолотировании. С. И. Матрюков.....	81
Типовой раздел по обеспечению защиты государственной тайны в Техническом задании на выполнение морских исследований. Н. С. Соколов, А. С. Тимонов.....	94
Прогнозирование приливных явлений на основе алгоритмов программного пакета OTPS и глобальной приливной модели TPXO. А. В. Маттис, В. Ю. Бахмутов	97

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

Разработка показателя гидрометеорологической опасности физико-географических районов в интересах обеспечения группировок войск (сил). А. А. Борисов, Н. Г. Козлов, А. Б. Маков	104
Анализ возможности применения бортовой системы регистрации параметров профиля атмосферы в Арктике. Ю. В. Гамбургер, В. В. Дмитрук, Н. О. Моисеева.....	111

CONTENTS

NAVIGATION

On the Issue of Developing a Long-Range Navigational Hydroacoustic System. K. A. Vinogradov, O. A. Gasnikov, Yu. M. Repin, K. G. Stavrov	7
Simulation Modeling of Marine Traffic for Planning a Safe Vessel Traffic Scheme. V. M. Grinyak, A. V. Shulenina, I. V. Babiyeu, A. V. Artemiev	15
Model of Functioning of On-Board Radioelectronic Equipment of Complex Technical Systems Based on Logical-Functional Description of Interacting Elements Using Petri Net. A. I. Loskutov, V. A. Klykov, A. V. Stolyarov, Yu. V. Perelygin.	27
Testing the Global High-Precision Positioning Service Hi-RTP™ of the Chinese Company Hi-Target. V. M. Smolin, S. V. Reshetnyak, D. F. Milyakov, O. L. Onishchenko	40
On the Implementation of the Foundations of State Policy in the Field of Naval Activities of the Russian Federation Until 2030. S. A. Piskun, A. M. Popov, A. V. Bezgodov	75

HYDROGRAPHY AND MARINE CARTOGRAPHY

On the Methods and Errors in Calculating the Vertical Sounding Velocity of the Sea During Echo Sounding. S. I. Mastryukov	81
A Typical Section on Ensuring the Protection of State Secrets in the Terms of Reference for Maritime Research. N. S. Sokolov, A. S. Timonov	94
Forecasting of Tidal Phenomena Based on Algorithms of the OTPS Software Package and the Global Tidal Model TPXO. A. V. Mattis, V. Yu. Bakhmutov	97

HYDROMETEOROLOGY

Development of an Indicator of Hydrometeorological Hazard of Physico-Geographical Areas in the Interests of Ensuring Troops (Force) Groups. A. A. Borisov, N. G. Kozlov, A. B. Makov	104
Analysis of the Possibility of Using an Airbourne Vertical Atmospheric Profiling System in Arctic. Yu. V. Gamburger, V. V. Dmitruk, N. O. Moiseeva	111

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАФИКА МОРСКОЙ АКВАТОРИИ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНОЙ СХЕМЫ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ

Гриняк В. М.¹, Шуленина А. В.², Бабиев И. В.¹, Артемьев А. В.³

¹Владивостокский государственный университет, г. Владивосток.

²Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток.

³Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского, г. Владивосток.

Аннотация. Работа посвящена проблеме планирования схемы маршрутов судов через акватории с интенсивным движением. Рассматривается задача разработки имитационной модели коллективного движения судов с целью априорной оценки безопасности той или иной схемы движения. В статье показаны основные параметры предложенной модели и результаты имитационного моделирования движения судов в заливе Находка.

Ключевые слова: безопасность судоходства, управление движением судов, система установления путей движения, интенсивное движение, опасное сближение, судопотоки, имитационное моделирование.

Для цитирования: Гриняк В. М., Шуленина А. В., Бабиев И. В., Артемьев А. В. Имитационное моделирование трафика морской акватории для планирования безопасной схемы движения судов // Навигация и гидрография. – 2024. – № 4 (77). – С. 15–26.

SIMULATION MODELING OF MARINE TRAFFIC FOR PLANNING A SAFE VESSEL TRAFFIC SCHEME

Grinyak V. M.¹, Shulenina A. V.², Babiyeu I. V.¹, Artemiev A. V.³

¹Vladivostok State University, Vladivostok.

²Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, Vladivostok.

³Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy, Vladivostok.

Abstract. The paper is devoted to the problem of planning the scheme of vessel routes through water areas with intensive traffic. The problem of developing a simulation model of collective vessel traffic for the purpose of a priori assessment of the traffic scheme safety is considered. The paper shows the main parameters of the proposed model and the results of the vessel traffic simulation in Nakhodka Bay.

Keywords: maritime safety, marine traffic control, traffic pattern, traffic intensity, collision risk assessment, ships flows, simulation modeling.

For citation: Grinyak V. M., Shulenina A. V., Babiyeu I. V., Artemiev A. V. Simulation Modeling of Marine Traffic for Planning a Safe Vessel Traffic Scheme // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 4 (77). – P. 15–26.

Введение

В настоящее время наблюдается постоянный рост объемов морских перевозок. Это приводит к увеличению числа акваторий с интенсивным трафиком. Традиционный подход к обеспечению навигационной безопасности движения судов заключается в регулировании отдельных участников движения. Их индивидуальное «поведение» рассматривается в контексте задач оценки риска опасного сближения судов, предотвращения их сближения и планирования безопасного пути [1]. На

акваториях с интенсивным движением этого может быть недостаточно – для обеспечения безопасного движения группы судов требуется координация действий всех участников группы [2, 3]. Одной из форм такой координации является установление на акватории правил движения: схемы безопасного движения или системы установления путей движения судов [4]. Планирование таких схем движения представляет собой актуальную и ёмкую научно-техническую задачу.

До появления современных автоматизированных средств судовождения планирование схемы движения на акватории происходило с учётом гидрографических особенностей выбранного района. Команды специалистов стремились создать максимально безопасные схемы движения, однако в условиях ограниченных возможностей навигации прошлых лет важным было наличие визуальных ориентиров, помогавших судоводителю следовать по выбранной траектории [5]. При недостатке естественных ориентиров (приметные мысы, горы, острова) создавались искусственные (буи, створные знаки, маяки). Возможные для реализации схемы движения соотносились с правилами судовождения и выбирались наиболее удобные для работы судоводителей и персонала береговых служб. Создаваемые таким образом схемы характеризовались не столько оптимальными решениями с точки зрения безопасности и пропускной способности, сколько простотой маневрирования. Позднее, при росте интенсивности трафика, нередко проявлялись ограничения таких «старых» схем [6, 7].

В условиях наступившей цифровой эпохи и развития нового поколения навигационных средств суда могут реализовать любые маршруты, допустимые их кинематикой, динамическими свойствами и географией акватории, без ограничений, связанных с использованием визуальных ориентиров. Это даёт возможность установить другие – более безопасные и производительные схемы движения судов.

В работах, опубликованных ранее, авторами изучались возможные подходы к планированию схем безопасного движения судов и оценке безопасности уже существующих схем. Так, в статьях [6, 7] была рассмотрена метрика оценки опасности схемы движения, существующей на выбранной акватории, основанная на частоте рисков опасных сближений судов. Эта частота определялась на основе ретроспективных данных о движении при помощи оценки числа и локализации точек кратчайшего сближения (СПА). В статье [8] была предложена целая система подобных метрик. Метрики основывались на учёте таких особенностей трафика как интенсивность, регулярность движения, характер распределения судов по акватории, что, наряду с прочим, позволило оценить насыщенность трафика [9]. Дополняя друг друга, метрики дают интегрированную оценку опасности того или иного района плавания.

В развитие проведённых исследований в статье [10] даётся формализованная постановка задачи планирования схемы безопасного движения на акватории. Показано многообразие возможных метрик для оценки опасности. Отмечено, что прямое решение задачи подбора множества возможных маршрутов судов, оптимизирующего заданный критерий, имеет очень высокую сложность и вряд ли возможно типовыми вычислительными средствами. В качестве альтернативного подхода авторы предложили интерпретировать схему движения как «конструктор» из примитивов, выделив четыре таких примитива:

- пересекающиеся судопотоки с односторонним движением,

- пересекающиеся судопотоки с двусторонним движением и близкой интенсивностью,
- пересекающиеся судопотоки с двусторонним движением и различной интенсивностью,
- судопотоки, пересекающиеся с зоной кругового движения.

Для каждого из примитивов могут быть оценены возможные метрики оценки опасности (выбор метрик и их значения зависят от предполагаемой интенсивности трафика, проходящего через примитив). Конструируя далее из набора примитивов возможные варианты схемы движения, можно оценить значения метрик опасности для акватории в целом при каждом варианте схемы. В статье [10] отмечалось, что полученные таким образом значения метрик опасности будут соответствовать некоторому «идеальному» варианту трафика, более полное (отвечающее реальному трафику) представление характерных особенностей движения на акватории требует проведения вычислительных экспериментов. Это, в свою очередь, требует разработки специальных имитационных моделей для численного моделирования трафика той или иной акватории. Настоящая работа посвящена описанию такой имитационной модели и некоторых результатов её использования при планировании схемы безопасного движения судов.

Основные модельные представления

Рассмотрим модель морской акватории, где выделены области, допустимые для движения судов. Типичные размеры морских акваторий, для которых планируются схемы движения, обычно не превышают 100 км, поэтому можно пренебречь шарообразностью Земли и использовать для моделирования прямоугольные декартовы координаты.

Введём на границах и внутри моделируемой акватории зоны «входа» на акваторию IN_i и зоны «выхода» из акватории OUT_j . Будем задавать свойства судопотока A_{ij} , следующего из зоны входа с номером i в зону выхода с номером j кортежем значений, характеризующих интенсивность судопотока, распределение судов по размерам, распределение судов по скоростям и динамические траекторные свойства судов. Зададим величину T – интервал времени, используемый для моделирования движения судов (шаг работы имитационной модели).

Зададим интенсивность судопотока из зоны IN_i в зону OUT_j величиной $INTENSITY_{ij}$, характеризующей среднее количество судов, выходящих из зоны IN_i в направлении OUT_j за единицу времени. Добавление нового судна к судопотоку A_{ij} происходит при реализации на каждом временном интервале T следующей процедуры:

ЕСЛИ $\text{rand} < T * INTENSITY_{ij}$, то добавить судно в зону IN_i ,

где rand – генерируемое случайное число, равномерно распределённое в интервале $[0, 1]$. Считается, что интервал T достаточно мал, чтобы величина $T * INTENSITY_{ij}$ была меньше 1. Начальные координаты судна задаются случайно, так, чтобы оно оказалось в соответствующей зоне IN_i . Удаление судна из судопотока происходит при достижении им зоны выхода из акватории.

При задании размеров судов будем иметь в виду, что в задачах обеспечения навигационной безопасности судовождения традиционно используют некую «зону безопасности» вокруг судна (корабельный домен), в которую не допускается вторжение других судов. В рассматриваемой имитационной модели будем

представлять эту зону безопасности в виде круга заданного радиуса. Примем, что радиусы зон безопасности судов, добавляемых системой к судопотоку, характеризуются случайной величиной с заданным распределением. Скорости судов также являются случайными величинами с известным распределением и могут коррелировать с их размерами (например, быть больше для малых судов).

К динамическим траекторным свойствам судов относятся их пропульсивная способность и маневренность. Первая характеризуется ускорениями при увеличении и уменьшении скорости судна, вторая – радиусом поворота.

Каждый судопоток A_{ij} имеет свою конфигурацию на акватории, включающую в себя ломаную, вдоль которой происходит движение судов и ширину судопотока (она может быть как постоянной, так и изменяться) (рис. 1).

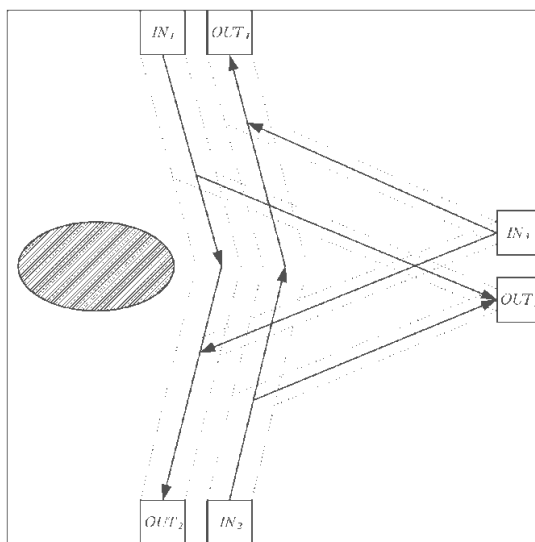


Рис. 1. Пример конфигурации судопотоков при моделировании (объяснения – в тексте)

На рис. 1 показана идея представления модели схемы движения судов на морской акватории. В рассмотренном примере имеются три зоны входа на акваторию – IN_1 , IN_2 , IN_3 и три зоны выхода из акватории – OUT_1 , OUT_2 , OUT_3 . Стрелками показаны направления движения судов, пунктирными линиями – ширина судопотока. Интенсивность и ширина судопотока между зонами 1 и 2 существенно выше, чем между ними и зоной 3. Заштрихованным овалом показана зона, запрещённая для плавания.

Движение судов описывается следующими дискретными кинематическими уравнениями:

$$x_{t+T} = x_t + T * V_t \sin K_t,$$

$$y_{t+T} = y_t + T * V_t \cos K_t,$$

$$V_{t+T} = V_t + \Delta V_t + \delta V_t,$$

$$K_{t+T} = K_t + \Delta K_t + \delta K_t,$$

где t – выбранный момент времени, x, y – относительные координаты судна, V и K – скорость и курс судна; ΔV и ΔK – величины, характеризующие детерминированное изменение скорости и курса судна в связи с ускорением (замедлением) или движением по кривой, при прямолинейном и равномерном движении судна на заданном участке судопотока эти величины равны 0; $\delta V, \delta K$ – величины, характеризующие случайное изменение скорости и курса, погрешности в движении (эти погрешности могут быть связаны как с самим судном, так и с воздействием ветра, волн, течения). При моделировании величины ΔV и ΔK подбираются таким образом, чтобы судно двигалось в пределах заданной геометрии судопотока и с допустимыми для того или иного участка судопотока скоростью и курсом.

Возможны различные метрики, характеризующие безопасность движения [8, 9], в настоящей работе рассматривается метрика, связанная с подсчётом количества опасных сближений судов на том или ином участке акватории. Количество опасных сближений оценивается следующим образом. Акватория разбивается на небольшие участки (например, квадраты), и для каждого участка создаётся счётчик, подсчитывающий число опасных сближений. В каждый моделируемый момент времени t вычисляется расстояние между судами (для каждой пары «судно – судно»). Если расстояние между судами пары оказалось меньше суммы радиусов их зон безопасности, то считается, что суда опасно сблизились, и счётчик соответствующего участка акватории увеличивается на 1 (за координаты точки сближения принимается точка кратчайшего сближения – СРА). При этом возможны два варианта дальнейшей интерпретации задачи, их можно условно назвать «с возвращением» и «без возвращения». При первом варианте сблизившиеся суда продолжают участвовать в процессе моделирования, в следующие моменты по ним также проводится расчёт количества опасных сближений. При втором считается, что сблизившаяся пара судов уже «внесла свой вклад» в значение метрики и соответствующие ей счётчики не увеличиваются. Расчёты по первому варианту значительно искажают полученную картину опасных участков акватории, особенно при малых значениях времени T , однако позволяют проводить верификацию работы системы. Расчёты по второму варианту более информативны с точки зрения дальнейшей интерпретации экспертами полученной картины распределения числа опасных сближений.

Таким образом, каждый моделируемый судопоток характеризуется следующими величинами:

- расположением и размерами соответствующих зон входа на акваторию IN_i и выхода из акватории OUT_j ;
- координатами точек ломаной, задающей геометрию судопотока и шириной судопотока на каждом участке;
- интенсивностью судопотока $INTENSITY_{ij}$;
- распределением размеров судов;
- распределением скоростей судов.

На каждой итерации моделирования движения к судопотоку добавляются (соответственно его интенсивности) новые суда. Суда, достигшие зоны выхода из акватории, удаляются из судопотока.

Каждое моделируемое судно характеризуется следующими величинами:

- координатами точки начала движения, находящейся в одной из зон входа на акваторию;

- судопотоком, которым судно будет следовать до зоны выхода из акватории;
- начальной скоростью V , определяемой распределением скоростей судов, движущихся в судопотоке;
- начальным курсом судна K , определяемым направлением движения в судопотоке;
- максимальными значениями величин ΔV и ΔK , определяемыми маневренностью судна по скорости и курсу;
- распределением случайных величин δV и δK , характеризующих погрешности движения;
- радиусом зоны безопасности судна, определяемой распределением размеров судов, движущихся в судопотоке.

На каждой итерации моделирования движения определяются текущие значения величин коррекции скорости и курса ΔV и ΔK и текущие координаты, скорость и курс судна, расстояния «судно – судно» для каждой пары судов, корректируется число опасных сближений.

Результаты имитационного моделирования

Для имитационного моделирования движения судов была разработана специальная программная система [11], позволяющая задавать параметры судопотоков, разбиение акватории на участки, величину интервала моделирования T и оценивающая опасность того или иного участка акватории по выбранной метрике. Ниже приводятся некоторые результаты моделирования трафика для ряда типичных конфигураций схемы движения с оценкой опасности по метрике, связанной с подсчётом количества опасных сближений судов.

Для демонстрации возможностей планирования схемы безопасного движения судов моделировалась конфигурация судопотоков, похожая на принятую в настоящее время в заливе Находка. На рис. 2 показан возможный вариант схемы движения судов между входом в залив (зоны входа и выхода 1), бухтой Врангеля (зоны входа и выхода 2) и бухтой Находка (зоны входа и выхода 3). Движение судов на рис. 2 происходит по двусторонним пересекающимся потокам с близкой интенсивностью.

При моделировании были приняты следующие параметры судопотоков и судов:

- интервал моделирования T равен 1 минуте;
- интенсивность судопотоков 1-2, 2-1, 1-3, 3-1, 2-3, 3-2 одинакова и равна 6 судов в час;
- скорости судов равномерно распределены в интервале от 15 до 30 узлов, случайное отклонение скорости δV равномерно распределено в интервале $\pm 1,5$ узлов;
- случайное отклонение курса δK равномерно распределено в интервале ± 2 градуса;
- радиус зоны безопасности судов принят детерминированным (для простоты моделирования) и равным 300 метров;
- с целью подсчета числа опасных сближений акватория разбивается на квадратные участки размером 0,01 морской мили (18,52 метров).

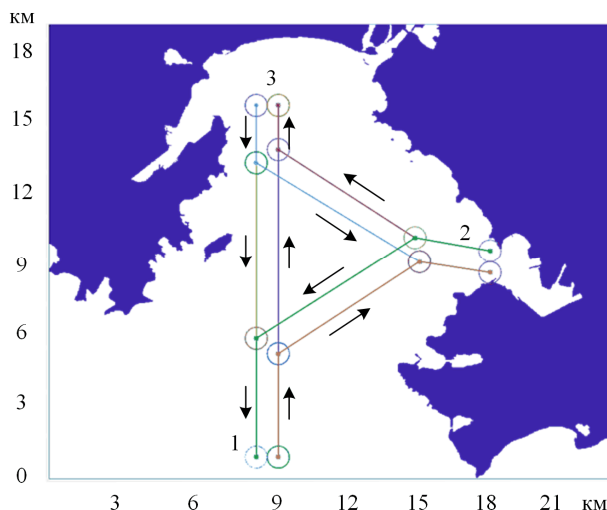


Рис. 2. Моделируемая конфигурация схемы движения судов для залива Находка

На рис. 3 и 4 показан результат подсчёта количества опасных сближений при движении судов по схеме рис. 2. Моделирование движения проводилось в течение 10 дней (то есть вычисления проводились для $60 \text{ мин.} \cdot 24 \text{ часа} \cdot 10 \text{ дней} = 14400$ итераций моделирования). Было зафиксировано 123 410 опасных сближений при схеме подсчёта «с возвращением» (рис. 3) и 3 263 опасных сближений при подсчёте «без возвращения» (рис. 4). Рис. 3 построен в относительной шкале: красный цвет соответствует 100 % от максимального количества опасных сближений на локальном квадратном участке, желтый – 60 %, зелёный – 40 %, синий – 20 %. Рис. 4 (а также рис. 5, 6) построен в абсолютной шкале: красный цвет равен 40 опасным сближениям за весь период моделирования, желтый – 25, зелёный – 16, синий – 8.

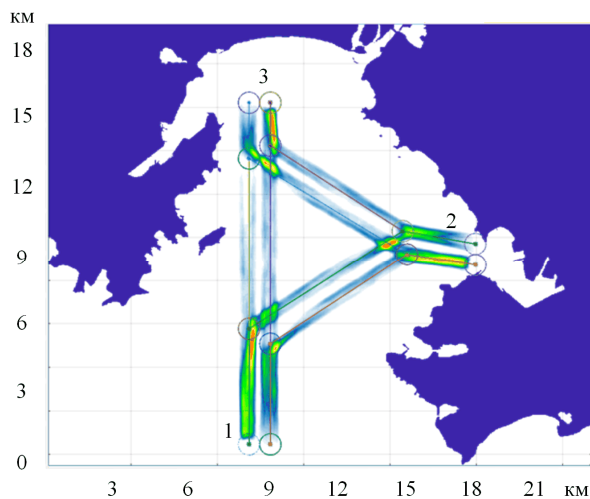


**Рис. 3. Результаты оценки количества опасных сближений в заливе Находка
(двусторонние пересекающиеся судопотоки, подсчёт «с возвращением»)
(объяснения – в тексте)**

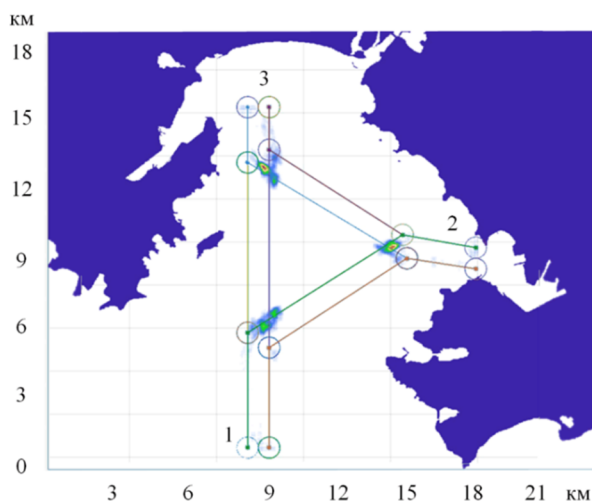


Рис. 4. Результаты оценки количества опасных сближений в заливе Находка (двусторонние пересекающиеся судопотоки, подсчёт «без возвращения») (объяснения – в тексте)

«Тепловая карта» рис. 3 и 4 показывает те участки акватории, где суда опасно сближаются чаще всего. На рис. 3 видно, что главным образом это зоны пересечения судопотоков и те их участки, на которых суда как бы «догоняют» друг друга. Способ построения рис. 4 выделяет участки, на которых суда опасно сближаются, двигаясь пересекающимися курсами.

Рассмотрим «альтернативные» варианты схемы движения для залива Находка. На рис. 5, 6 показаны результаты подсчёта количества опасных сближений судов при переходе к круговой схеме движения (подсчёт «без возвращения»).



Рис. 5. Результаты оценки количества опасных сближений в заливе Находка (круговое движение вариант 1, подсчёт «без возвращения») (объяснения – в тексте)

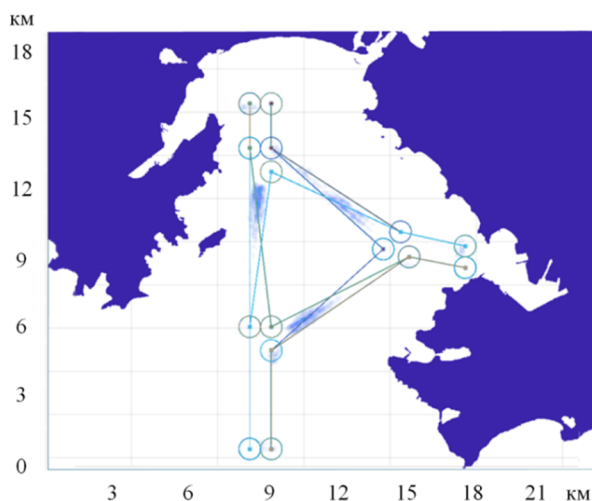


Рис. 6. Результаты оценки количества опасных сближений в заливе Находка (круговое движение вариант 2, подсчёт «без возвращения») (объяснения – в тексте)

На рис. 6 пересечение судопотоков идёт под более острым углом, чем на рис. 5, что приводит к ожидаемому уменьшению числа опасных сближений и на акватории в целом (2 486 сближений на рис. 5 и 2301 сближений на рис. 6) и локально, в зонах сближения судов (на рис. 4 есть красные и жёлтые участки, на рис. 5 – зелёные, на рис. 6 – только синие).

Результаты имитационного моделирования движения судов в заливе Находка

	Схема движения	Число опасных сближений на акватории в целом	Средний интервал между опасными сближениями (мин.)	Максимальное число опасных сближений на локальном участке
1	Двусторонние пересекающиеся судопотоки (рис. 4)	3 263	4,4	44
2	Круговое движение, вариант 1 (рис. 5)	2 486	5,8	28
3	Круговое движение, вариант 2 (рис. 6)	2 301	6,3	15

Результаты моделирования рис. 3–5 сведены в таблицу, где показан также средний интервал между опасными сближениями. Его увеличение при переходе к круговой схеме движения с 4,4 мин. до почти 6 мин. существенно снижает нагрузку на операторов береговых систем управления движением судов, так как даёт больше времени на реагирование и отдачу команд участникам движения, уменьшает возможность наступления нескольких опасных ситуаций одновременно.

Обсуждение результатов

Рассмотренный подход к моделированию трафика в целом позволяет оценить безопасность той или иной схемы движения судов по выбранной метрике. Вместе с тем на акваториях помимо регулярных судопотоков может иметь место и нерегулярный трафик (прибрежный лов, прогулочные катера и яхты и т. п.), характеризующийся хаотичностью траекторий. В некоторых случаях такой нерегулярный трафик может давать существенный вклад в метрики оценки опасности [12, 13]. Моделирование таких, хаотично движущихся по акватории, судов может осуществляться в рамках рассмотренного подхода посредством задания множества зон входа на акваторию и выхода с акватории и формирования случайной конфигурации судопотоков, их соединяющих. При этом число таких «нерегулярных» судопотоков должно быть достаточно велико, а интенсивность движения по ним судов должна быть низкой. Вопросам моделирования нерегулярного трафика и его влияния на суда, движущиеся в регулярных судопотоках, авторы планируют посвятить отдельное исследование.

Существуют математические модели, описывающие напряжённость плавания в том или ином районе: общую вероятность встречи судов в районе, вероятность встречи, нормализованную по времени или расстоянию плавания, частоту (или интенсивность) встреч. Например, модель, приведённая в работе [14] описывается в терминах вероятностей случайных величин, описывающих параметры судопотоков. Аналитическое представление функциональных зависимостей модели напряжённости плавания [14] представляет собой хоть и разрешимую, но довольно сложную задачу; для оценки безопасности той или иной акватории по этой модели прибегают к численному моделированию или приближённым численным методам интегрирования. Недостатком всех таких моделей является то, что они хорошо описывают сравнительно большие районы плавания (несколько десятков и сотни миль), когда можно пренебречь линейными размерами судов.

Общей особенностью задач имитационного моделирования является необходимость верификации и валидации получаемых результатов [15]. В рассматриваемой задаче такая верификация возможна путём соотнесения результатов моделирования с априорной оценкой метрик опасности движения, получаемых на основе представления акватории множеством примитивов [10]. Подчеркнём, что корректно сравнивать в этом случае можно будет не количественную оценку метрик, а качественную картину их распределения по акватории. Определенный вклад в верификацию результатов моделирования может дать оценка метрик при их подсчёте «с возвращением», как на рис. 3. Валидация результатов моделирования осуществляется путём экспертной оценки вариантов схем движения на предмет возможности их использования в реальных условиях мореплавания.

Заключение

В статье рассматривается задача планирования схем безопасного движения судов. Перспективным путём решения задачи является построение схемы из примитивов движения и оценка её опасности по выбранной метрике (метрикам) путём имитационного моделирования. В работе предложен вариант такой имитационной модели коллективного движения судов на выбранной акватории.

Результаты проведённого исследования дают представление о характерных особенностях имитационной модели. Она позволяет оценить значения выбранных метрик опасности как для акватории в целом, так и «увидеть» наиболее нагруженные и опасные участки, требующие повышенного внимания со стороны судоводителей и береговых служб. Моделируя трафик акватории согласно той или иной схеме движения и соотнося полученные результаты, можно выбрать наиболее подходящую схему их возможных.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что предложенного множества параметров модели, определяющих лишь кинематические свойства движения судов и не учитывающих явно динамику и особенности их движения в водной среде, в целом достаточно для информативного решения задачи.

Благодарности

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Tam Ch. K., Bucknall R., Greig A. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters // *Journal of Navigation*. – 2009. – Vol. 62. – № 3. – P. 455–476.
2. Кирсанов М. Н. Анализ алгоритмов выбора оптимальных маршрутов группы судов // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. – 2016. – № 2. – С. 183–190.
3. Артемьев А. В., Яковенко Е. А., Оськин Д. А. Разработка алгоритма и программы для моделирования расхождения автономных судов // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2023. – № 4–3. – С. 76–85.
4. Лентарёв А. А. Проблемы организации движения судов в дальневосточных водах // *Транспортное дело России*. – 2015. – № 6. – С. 256–257.
5. Таратынов В. П. Судовождение в стесненных районах. М.: Транспорт, 1980. – 128 с.
6. Гриняк В. М., Иваненко Ю. С. Использование данных АИС для оценки опасности коллективного движения на морской акватории // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2017. – № 3(18). – С. 18.
7. Гриняк В. М., Девятисильный А. С., Иваненко Ю. С. Оценка опасности движения на акватории по данным автоматической идентификационной системы // *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. – 2017. – № 10. – С. 41–46.
8. Гриняк В. М., Иваненко Ю. С., Люлько В. И., Шулина А. В., Шурыгин А. В. Цифровое представление и комплексная оценка навигационной безопасности движения на морских акваториях // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2020. – Т. 8. – № 1(28).
9. Гриняк В. М., Девятисильный А. С., Шулина А. В. Оценка эмоциональной нагрузки на судоводителей в условиях коллективного движения // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. – 2019. – Т. 11. – № 4. – С. 640–651.
10. Гриняк В. М., Девятисильный А. С., Шулина А. В. Моделирование схемы безопасного движения морской акватории // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2021. – № 3–1(53). – С. 127–134.
11. Гриняк В. М., Шулина А. В. Программа для имитационного моделирования движения судов на морских акваториях. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680994 Российская Федерация. Заявл. 26.10.2022. Оpubл. 09.11.2022.
12. Zhao L., Shi G. Maritime anomaly detection using density-based clustering and recurrent neural network // *Journal of Navigation*. – 2019. – Vol. 72. – № 4. – P. 894–916.

13. Shi Y., Long C., Yang X., Deng M. Abnormal Ship Behavior Detection Based on AIS Data // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – № 9. – P. 4635.
14. Лентарёв А. А. Основы теории управления движением судов. Монография. – Владивосток: Мор. гос. ун-т., 2019. – 196 с.
15. Сальников А. В., Французов М. С., Виноградов К. А., Пятунин К. Р., Никулин А. С. Верификация и валидация компьютерных моделей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 9(750). – С. 100–115.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

ГРИНЯК Виктор Михайлович, профессор Владивостокского государственного университета, доктор технических наук, e-mail: viktor.grinyak@vvsu.ru.

Victor M. GRINYAK, Professor of Vladivostok State University, Doctor of Sciences, e-mail: viktor.grinyak@vvsu.ru.

ШУЛЕНИНА Алена Викторовна, младший научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН, e-mail: shuleninaav@mail.ru.

Alena V. SHULENINA, Junior Researcher of Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, e-mail: shuleninaav@mail.ru.

БАБИЕВ Илья Владимирович, студент Владивостокского государственного университета, e-mail: babiyeviv@vvsu.ru.

Ilya V. BABIYEV, Student of Vladivostok State University, e-mail: babiyeviv@vvsu.ru.

АРТЕМЬЕВ Андрей Владимирович, доцент Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского, кандидат технических наук, e-mail: artemyevav@msun.ru.

Andrey V. ARTEMIEV, Assistant Professor of Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy, Candidate of Sciences, e-mail: artemyevav@msun.ru.