

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА»

ВЕСТНИК

**ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА**

Том 18. № 4

**Vestnik Gosudarstvennogo universiteta
morskogo i rechnogo flota
imeni admirala S. O. Makarova**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2026



Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2026. — Т. 18. — № 4. — 214 с.

ISSN 2309-5180 (print)

ISSN 2500-0551 (online)

«Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» является научным периодическим изданием, зарегистрированным Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство о регистрации СМИ от 17 июля 2013 г. ПИ № ФС 77-54734).

В «Вестнике» публикуются материалы оригинальных научных исследований и основных результатов диссертационных работ на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

2.5.19 «Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства (технические науки)»;

2.5.20 «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) (технические науки)»;

2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)»;

2.9.7 «Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография (технические науки).

Статьи тщательно отбираются по критериям новизны, актуальности, научно-практической значимости, возможности реального использования описанных в них новых технологий на водном транспорте, публикуются на русском и английском языках. Статьи рецензируются независимыми экспертами. Кроме того, в «Вестнике» публикуются обзорные материалы научных конференций, семинаров и совещаний, сообщения и статьи к юбилейным датам ведущих ученых и знаменательным событиям университета.

«Вестник» включен в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ.

Индекс для подписки в каталоге агентства «Урал-Пресс» — 37276.

Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
**«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
имени адмирала С. О. Макарова»**

Адрес учредителя и издателя

198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

Адрес редакции

198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

e-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

ISSN 2309-5180



© Государственный университет морского и речного
флота имени адмирала С. О. Макарова, 2026

Гл. редактор

С. О. Барышников
д-р техн. наук, проф.

Зам. гл. редактора

А. П. Нырков
д-р техн. наук, проф.

Члены
редакционной
коллегии:

А. Е. Сазонов
д-р техн. наук, проф.,
чл.-кор. РАН

О. К. Безюков,
д-р техн. наук, проф.

А. Т. Беккер,
д-р техн. наук, проф.

Н. И. Ватин,
д-р техн. наук, проф.

П. А. Гарибин,
д-р техн. наук, проф.

Д. П. Голоскоков,
д-р техн. наук, проф.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ
СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 565**

Фирсов Ю. Г., Иванов М. В., Колосков Е. Н. Детальная съемка рельефа на континентальном склоне северного ледовитого океана и методы представления ее результатов с использованием гидрографических информационных технологий 565

Майоров Н. Н., Язвенко М. Р. Исследование загруженности системы морских пассажирских паромных причалов в регионе моря с учетом динамического формирования и изменений в маршрутных региональных сетях 580

Ситов А. Н., Кузнецов А. Л., Сперанская Я. А. Методы динамического моделирования в исследовании фрахтового рынка 593

Акмайкин Д. А. Анализ современных автоматизированных систем планирования маршрута судна: функциональные возможности, ограничения и тенденции развития 603

Ермаков Н. Д., Астреин В. В. Применение методов нейросетевого слияния данных автоматической идентификационной системы и радиолокационной станции в судовой интеллектуальной системе мониторинга 614

Мажирин И. А. Идентификация параметров математической модели движения судна с активными средствами управления генетическим алгоритмом 625

Семенов В. В., Буцанец В. В., Каретников А. А. Обоснование выбора метода оценки риска в области применения безэкипажного буксира в портовой зоне 638

Сичкарев В. И., Умрихин В. П., Тарасенко М. Д. Амплитудно-частотная характеристика качки судна по данным, полученным в рейсе 650

Заварзин Р. В. Учет гряд и волн руслового рельефа при расчете уменьшения глубины на судовом ходу при побочном строении дна 664

Реуцкий А. С., Ольховик О. Е., Дмитриева Т. М. Классификация моделей учета выбросов парниковых газов морскими судами 677

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-54734 от 17 июля 2013 года

Подписка на журнал осуществляется онлайн на сайте «Урал-Пресс»
www.ural-press.ru/catalog/98131/8994732 (подписной индекс — 37276)

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются

В. Л. Ерофеев,
д-р техн. наук, проф.

В. А. Жуков,
д-р техн. наук, доц.

Ю. М. Искандеров,
д-р техн. наук, проф.

В. В. Каретников,
д-р техн. наук, доц.

А. В. Кириченко,
д-р техн. наук, проф.

М. Н. Кирсанов,
д-р физ.-мат. наук, проф.

Е. А. Королева,
д-р экон. наук, проф.

И. И. Костылев,
д-р техн. наук, проф.

А. Л. Кузнецов,
д-р техн. наук, проф.

В. А. Логиновский,
д-р техн. наук, проф.

А. В. Макианов,
д-р техн. наук, проф.

В. Е. Марлей,
д-р техн. наук, проф.

Т. А. Пантина,
д-р экон. наук, проф.

В. И. Решняк,
д-р техн. наук, проф.

А. В. Саушев,
д-р техн. наук, доц.

С. В. Смоленцев,
д-р техн. наук, проф.

С. С. Соколов,
д-р техн. наук, доц.

М. В. Сухотерин,
д-р техн. наук, доц.

А. Л. Тезиков,
д-р техн. наук, проф.

А. А. Чертков,
д-р техн. наук, доц.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА 713

Григорьев М. Н., Королёва Е. А., Уваров С. А. Обучение с подкреплением
в управлении производственной логистикой судостроительных предприятий:
сравнительный анализ результатов и перспективы развития 713

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ) 730

Федоровский К. Ю., Широких Н. К. Снижение негативного
воздействия систем охлаждения энергоустановок судов
на биоресурсы морей Северного морского пути 730

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ 744

Макарчук А. В., Макарчук Н. В., Голубов Н. К. Динамическая модель
оценки надежности эргатической системы «судоводитель – информационная
система» с адаптивным управлением человеческим фактором 744

Полковникова Н. А., Полковников А. К. Интеллектуальная система
поддержки принятия решений для главных судовых
дизельных двигателей на основе нечеткой логики 755

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 565

Firsov Y. G., Ivanov M. V., Koloskov E. N. Detailed survey
of seafloor relief on the continental slope of the arctic ocean and methods
for presenting its results using hydrographic information technologies..... 565

Maierov N. N., Yazvenko M. R. Assessment of sea passenger
ferry berth occupancy under dynamic formation and changes
in regional route networks 580

Sitov A. N., Kuznetsov A. L., Speranskaya Y. A. Dynamic modeling
methods in freight market research 593

Akmaykin D. A. Analysis of modern automated ship route planning systems:
functional capabilities, limitations, and development trends..... 603

Ermakov N. D., Astrein V. V. Neural network-based data fusion methods
for automatic identification system and radar data in a shipboard intelligent
monitoring system..... 614

Mazhirin I. A. Identification of parameters of a mathematical model
of ship motion with active control devices using a genetic algorithm..... 625

Semenov V. V., Karetnikov V. V., Butsanets A. A. Rationale for selecting
a risk assessment method for unmanned tug operations in a port area..... 638

Sichkarev V. I., Umrikhin V. P., Tarasenko M. D. Amplitude-frequency
characteristic of ship rolling based on data obtained during a voyage..... 650

Zavarzin R. V. Accounting for dunes and channel-bed waves
when calculating depth reduction in the navigation channel
with a side-bar bed configuration..... 664

Reutskii A. S., Ol'khovik E. O., Dmitrieva T. M. Classification of models
for accounting for greenhouse gas emissions from seagoing ships 677

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION..... 713

Grigoriev M. N., Koroleva E. A., Uvarov S. A. Reinforcement learning
in production logistics management at shipbuilding enterprises:
comparative analysis of results and development prospects..... 713

Volume 18. № 4

2026

EDITORIAL BOARD

S. O. Baryshnikov
Doctor of Technical Sciences

Deputy Editor-in-Chief
A. P. Nyrkov
Doctor of Technical Sciences

Members of the editorial board:

A. Ye. Sazonov
Doctor of Technical Sciences,
Prof.,
corresponding member
of the Russian Academy
of Sciences

O. K. Bezyukov,
Doctor of Technical Sciences

A. T. Bekker,
Doctor of Technical Sciences

N. I. Vatin,
Doctor of Technical Sciences

P. A. Garibin,
Doctor of Technical Sciences

D. P. Goloskokov,
Doctor of Technical Sciences

V. L. Erofeev,
Doctor of Technical Sciences

V. A. Zhukov,
Doctor of Technical Sciences

V. V. Karetnikov,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Kirichenko,
Doctor of Technical Sciences

M. N. Kirsanov,
Doctor of Phys.-Math. Sciences

E. A. Koroleva,
Doctor of Economic Sciences

I. I. Kostylev,
Doctor of Technical Sciences

A. L. Kuznetsov,
Doctor of Technical Sciences

V. A. Loginovskiy,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Makshanov,
Doctor of Technical Sciences

V. Ye. Marley,
Doctor of Technical Sciences

T. A. Pantina,
Doctor of Economic Sciences

V. I. Reshnyak,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Saushev,
Doctor of Technical Sciences

S. V. Smolentsev,
Doctor of Technical Sciences

S. S. Sokolov,
Doctor of Technical Sciences

M. V. Sukhoterin,
Doctor of Technical Sciences

A. L. Tezikov,
Doctor of Technical Sciences

A. A. Chertkov,
Doctor of Technical Sciences

**SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS
(MAIN AND AUXILIARY)..... 730**

Fedorovskiy K. Y., Shirokikh N. K. Reducing the negative impact
of ship power plant cooling systems on the biological resources
of the seas along the northern sea route 730

**AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL
PROCESSES AND PRODUCTIONS 744**

Makarchuk A. V., Makarchuk N. V., Golubov N. K. Dynamic model
for reliability assessment of the ergatic system “navigator–information system”
with adaptive human-factor control 744

Polkovnikova N. A., Polkovnikov A. K. Intelligent fuzzy inference-based
decision-support system for marine main diesel engines 755

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-565-579

EDN TALHJY

УДК 910.27

ДЕТАЛЬНАЯ СЪЕМКА РЕЛЬЕФА НА КОНТИНЕНТАЛЬНОМ СКЛОНЕ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА И МЕТОДЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЕЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ю. Г. Фирсов¹, М. В. Иванов², Е. Н. Колосков²

¹ ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ФГБУ «ВНИИОкеангеология»,
Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены новые современные детальные батиметрические данные по прилаптевоморскому сектору континентального склона Евразийского бассейна. Отмечено исключительное значение данного района для исследования геологического строения и широкого круга природных процессов. Приведены актуальные сведения о современном состоянии батиметрической изученности прилаптевоморского сектора континентального склона Северного Ледовитого океана, основанные на международных моделях IBСАО версии 5 и GEBCO 2025. Отмечается неравномерность батиметрического покрытия и отсутствие в указанных международных батиметрических моделях результатов российских батиметрических съемок, выполненных в период 2010–2024 гг. Приведены сведения по результатам современной батиметрической съемки, выполненной в 2022 и 2024 гг. на океанографическом исследовательском судне «Янтарь» в прилаптевоморском секторе континентального склона Евразийского бассейна. Отмечается, что детальная площадная съемка рельефа дна в прилаптевоморском секторе континентального склона Евразийского бассейна была проведена впервые, и использование современных гидрографических информационных технологий позволило в полной мере выявить потенциал, заложенный в гидроакустической информации, предоставляемой современными многолучевыми эхолотами. Подчеркивается, что применение гидрографических информационных технологий позволило выявить в этом районе новые формы рельефа, связанные с развитием ранее неизученных геологических процессов. Приведена подробная батиметрическая модель рельефа всего района съемки, а также детальная модель рельефа участка дна с развитием грязевулканических форм. Зафиксированы различия в строении поверхности дна зоны хребта Гаккеля и континентального склона к западу от нее. Выявлены несколько генераций оползневых тел, активные и отмершие долинные формы. Обращается внимание, что в долине Садко имеет место сложное сочетание неотектонических и гравитационных процессов, хорошо прослеживаемых на детальной батиметрической модели рельефа. Даны рекомендации по актуализации нормативных документов для проведения батиметрических съемок для обеспечения морских геологических исследований и требований к окончательной обработке данных площадной съемки рельефа.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, Евразийский бассейн, прилаптевоморский континентальный склон, долина Садко, площадная батиметрическая съемка, многолучевой эхолот, детальные батиметрические данные, акустическое изображение дна, цифровые модели рельефа, трехмерное изображение дна.

Для цитирования:

Фирсов, Ю. Г. Детальная съемка рельефа на континентальном склоне северного ледовитого океана и методы представления ее результатов с использованием гидрографических информационных технологий / Ю. Г. Фирсов, М. В. Иванов, Е. Н. Колосков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 4. С. 565–579. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-565-579.

DETAILED SURVEY OF SEAFLOOR RELIEF ON THE CONTINENTAL SLOPE OF THE ARCTIC OCEAN AND METHODS FOR PRESENTING ITS RESULTS USING HYDROGRAPHIC INFORMATION TECHNOLOGIES

Yu. G. Firsov¹, M. V. Ivanov², E. N. Koloskov²

¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² FSBI "VNIIOkeangeologiya",
St. Petersburg, Russian Federation

New up-to-date detailed bathymetric data on the Laptev Sea sector of the continental slope of the Eurasian Basin are considered. The exceptional importance of this area for studying its geological structure and a wide range of natural processes is noted. Current information on the present state of bathymetric coverage of the Laptev Sea sector of the continental slope of the Arctic Ocean, based on the international IBCAO Version 5 and GEBCO 2025 models, is presented. The unevenness of bathymetric coverage and the absence from these international bathymetric models of the results of Russian bathymetric surveys carried out in 2010–2024 are noted. Information on the results of modern bathymetric surveys conducted in 2022 and 2024 aboard the oceanographic research vessel Yantar in the Laptev Sea sector of the continental slope of the Eurasian Basin is presented. It is noted that a detailed areal survey of the seafloor relief in the Laptev Sea sector of the continental slope of the Eurasian Basin was conducted for the first time, and that the use of modern hydrographic information technologies made it possible to fully reveal the potential inherent in the hydroacoustic information provided by modern multibeam echo sounders. It is emphasized that the application of hydrographic information technologies made it possible to identify new relief forms in this area associated with the development of previously unstudied geological processes. A detailed bathymetric model of the relief of the entire survey area is presented, as well as a detailed relief model of a seafloor area with mud-volcanic forms. Differences in the structure of the seafloor surface of the Gakkel Ridge zone and the continental slope to the west of it are recorded. Several generations of landslide bodies and active and inactive valley forms are identified. Attention is drawn to the complex combination of neotectonic and gravitational processes in the Sadko Valley, which are clearly traceable in the detailed bathymetric relief model. Recommendations are given for updating regulatory documents on conducting bathymetric surveys to support marine geological research and on requirements for the final processing of areal seafloor survey data.

Keywords: Arctic Ocean, Eurasian Basin, Laptev Sea continental slope, Sadko Valley, full-coverage bathymetric survey, multibeam echo sounder, detailed bathymetric data, acoustic seafloor image, digital terrain models, three-dimensional seafloor image.

For citation:

Firsov, Yuri G., M. V. Ivanov and E. N. Koloskov. "Detailed survey of seafloor relief on the continental slope of the arctic ocean and methods for presenting its results using hydrographic information technologies." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.4 (2026): 565–579. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-565-579.

Введение (Introduction)

Изучение рельефа дна Мирового океана является тем фундаментом, на котором основываются морские науки. Гидрографические исследования первоначально ставили задачи изучения рельефа только прибрежных районов океанов в целях обеспечения безопасности мореплавания, а интерес к измерению больших океанских глубин возник только во второй половине XIX в. в связи с необходимостью прокладки трансокеанских телеграфных кабелей. Такие съемки, не связанные с созданием навигационных морских карт, называются *батиметрическими*.

В нашей стране батиметрические исследования начались в конце 40-х гг. XX в. и связаны с именем профессора Г. Б. Удинцева — исследователя рельефа дна океанов, именем которого назван трансформный разлом в Тихом океане, ученого в течение длительного времени возглавлявшего изучение рельефа дна Тихого и Индийского океанов на научно-исследовательском судне «Витязь». Съемка рельефа дна выполнялась в виде маршрутного промера с использованием однолучевых эхолотов (ОЛЭ)¹. Впервые была разработана и внедрена методика *геоморфологического картирования*.

¹ Удинцева О. Г. Исповедь сына века : воспоминания, очерки. СПб.: Серебряный век. 2024. 814 с.

В СССР были опубликованы батиметрические карты масштаба 1: 5 000 000, использованные для подготовки проектов Генеральной батиметрической карты Мирового океана. В этот период начались изучение рельефа дна Северного Ледовитого океана (СЛО) и подготовка батиметрических карт. Начиная с 2010 г. Российская Федерация выполнила в СЛО большой объем маршрутной батиметрической съемки с использованием многолучевых эхолотов (МЛЭ) для обоснования национального представления на расширенный континентальный шельф в Арктике². Информация по батиметрической изученности СЛО представлена в монографии [1].

Целью исследования является представление впервые полученных результатов детальной площадной батиметрической съемки, выполненной в 2022 и 2024 гг. в южной части «зоны Садко» и позволившей получить наглядные 2/3D цифровые изображения рельефа дна на глубинах более 2000 м. Получение такой информации стало возможным на основе применения МЛЭ и компьютерных технологий обработки и анализа гидроакустической информации о морском дне, включая технологии различных вариантов визуализации цифровых моделей рельефа, что является актуальным для решения задач морской геологии.

Методы и материалы (Materials and methods)

Батиметрическая изученность СЛО, выполненная РФ в период 2010–2024 гг. для обоснования национального представления на расширенный континентальный шельф в виде галсов многолучевой съемки, представлена на карте-схеме, приведенной на рис. 1. Маршрутная многолучевая съемка проводилась в 2010–2020 гг. В 2022 г. и 2024 г. в связи с изменением концепции российского представления о положении внешней границы континентального шельфа (ВГКШ) была выполнена площадная съемка в двух районах юго-восточной части хребта Гаккеля на континентальном склоне моря Лаптевых (см. легенду на рис. 1).

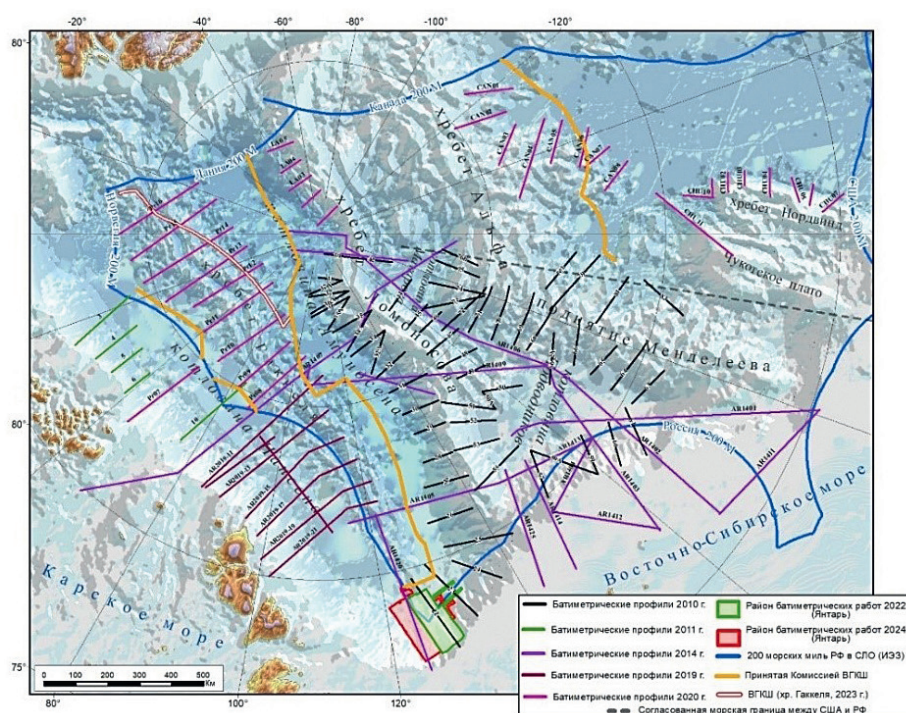


Рис. 1. Российская батиметрическая изученность Северного Ледовитого океана для обоснования ВГКШ в 2010–2024 гг.
Fig. 1. Russian Bathymetric Coverage of the Arctic Ocean for Substantiating the Outer Limit of the Continental Shelf in 2010–2024

² Частичное пересмотренное Представление Российской Федерации в Комиссию по границам континентального шельфа в отношении континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане. 2015 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.un.org/depts/los/clcs_new/submissions_files/rus03/2023rusrev3r.pdf.

Лаптевоморский фланг хребта Гаккеля, включая сектор континентальной окраины моря Лаптевых, давно привлекает морских геологов, изучающих Евразийский бассейн СЛО. Данные о рельефе дна до последнего времени были довольно отрывочными и недостаточными для необходимой геологической изученности этого района, частично расположенного внутри исключительной экономической зоны России. В рельефе дна находит отражение геологическая структура и запечатлены результаты действия эндогенных и экзогенных сил. Рельеф контролирует проявление широкой группы процессов обмена вещества и энергии в системе «шельф – глубоководный бассейн».

Специфика лаптевоморского сектора континентальной окраины Евразии заключается в том, что шельф здесь является мелководным и аномально узким. Другая важная особенность этого сектора континентальной окраины состоит в том, что к ней подходит срединно-океанический хребет Гаккеля.

Зона сочленения хребта с континентальной окраиной до недавнего времени привлекала исключительно научное внимание. Результаты геофизических исследований, выполненных в этом районе, опубликованы во многих работах, включая, например, исследования [2], [3]. Проблема отчасти состояла в отсутствии надежных сведений о рельефе дна. Район продолжения хребта Гаккеля к юго-востоку от впадины с рабочим названием «впадина Киселева», которую в зарубежных публикациях часто называют Gakkel Ridge Deep, является наименее изученным в батиметрическом отношении. Согласно Газетиру GEBCO³, единственный топоним подводного рельефа в этом районе обозначен как «Долина Садко» (Sadko Valley). Современные российские батиметрические съемки обнаружили в этом районе, который в дальнейшем будем называть «зоной Садко», ранее неизвестные подводные горы и другие отличительные формы подводного рельефа, которые до сих пор остаются безымянными.

В международных батиметрических моделях^{4,5} район зоны Садко показан на основе двух галсов многолучевой съемки, выполненной научно-исследовательским ледоколом «Полярштерн» PS-72 (2008 г.) и PS-78 (2011 г.), вдоль простираения этой структуры до границы исключительной экономической зоны РФ и далее к изобате 500 м.

Оценка текущего состояния батиметрической изученности СЛО по состоянию на 2024 г. (батиметрическая модель IBCAO версии 4) была представлена в работе [4]. Авторы статьи, являющиеся признанными авторитетами в части картографирования СЛО и членами редколлегии IBCAO, утверждают, что в СЛО имеются несколько районов с недопустимо низкой батиметрической изученностью.

Оценка состояния батиметрической изученности СЛО на основе реальных глубин, полученных от МЛЭ и использованных для создания модели IBCAO v.5, представлена в работе [5]. В этой работе было проведено сравнение данных многолучевой съемки, положенных в основу моделей IBCAO v.4 и v. 5 на основе применения технологии регулярной сетки TID (Type Identifier), реализованной в некоторых геоинформационных системах. Результаты сравнения IBCAO v. 4 и 5 представлены на рис. 2.

Реальные батиметрические данные моделей IBCAO v. 4 и IBCAO v. 5, доступные для экспорта в виде данных из регулярных сетей, известны как Type Identifier Data (TID). Они позволяют извлекать из батиметрических моделей оценки глубин из центров ячеек грида и выполнять сравнение реальных данных о глубинах, полученных по результатам многолучевой съемки. Анализ батиметрических данных TID, положенных в основу сравнения моделей IBCAO v. 4 и 5, позволяет сделать вывод о том, что новые данные по лаптевоморскому сектору континентальной окраины в них отсутствуют.

³ Undersea Feature Names. A digital gazetteer of the names of features on the seafloor <https://www.gebco.net/data-products/undersea-feature-names#toc-a-digital-gazetteer-of-the-names-of-features-on-the-seafloor>.

⁴ The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO v.5). [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/arctic_ocean/ (дата обращения: 27.06.2028 г.).

⁵ The GEBCO 2025 Grid [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gebco.net/data-products-gridded-bathymetry-data/gebco2025-grid> (дата обращения: 27.08.2026).

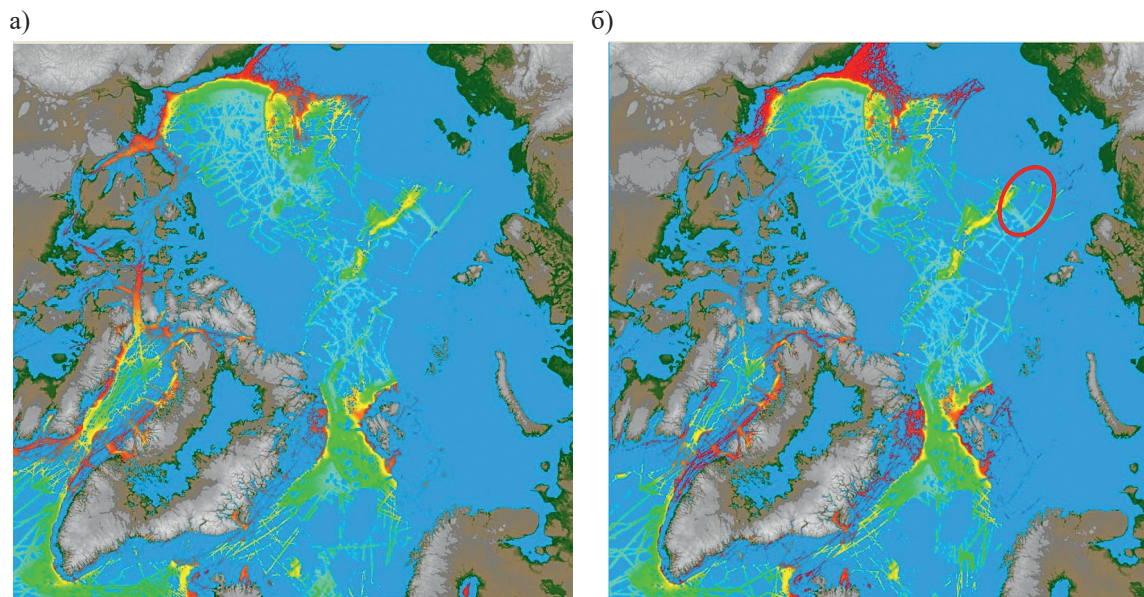


Рис. 2. Сравнение данных многолучевой батиметрической съемки, использованных в батиметрических моделях IBCAO:

а — батиметрическая модель IBCAO v.4; б — батиметрическая модель IBCAO v.5

Fig. 2. Comparison of Multibeam Bathymetric Survey Data Used in the IBCAO Bathymetric Models:
а — IBCAO v.4; б — IBCAO v.5

Новое частичное пересмотренное Представление в Комиссию по границам континентального шельфа в отношении континентального шельфа Российской Федерации в СЛЮ в районе хребта Гаккеля было подано в 2023 г.⁶ Оно находится в стадии рассмотрения Комиссии и требует усиления доказательств в части классификации хребта Гаккеля в качестве подводного хребта в категориях ст. 76 Конвенции по морскому праву 1982 г. Для классификации хребта Гаккеля как подводного хребта требуется предоставление детальных батиметрических данных, подтверждающих его непрерывность и пространственную связь с евразийским континентом.

Первая российская маршрутная многолучевая батиметрическая съемка в лаптевоморском секторе континентальной окраины была выполнена на НЭС «Академик Федоров» в 2020 г. [6]. Для получения детальной батиметрической информации, необходимой для решения указанных задач, в 2022 и 2024 гг. Федеральным агентством по недропользованию «Роснедра», были организованы комплексные экспедиционные работы на океанографическом исследовательском судне (ОИС) «Янтарь» (рис. 3), принадлежащем Главному Управлению глубоководных исследований Министерства обороны (ГУГИ МО).

ОИС «Янтарь» оборудован автоматизированным гидрографическим комплексом на базе глубоководного многолучевого эхолота (МЛЭ) SeaBat-7150 (фирма RESON-TELEDYNE) с частотой 12 /24 кГц. Детальная площадная съемка рельефа выполнялась под управлением электронных гидрографических систем (ЭГИС) QINSy (фирма QPS) и PDS TELEDYNE. Возможности МЛЭ SeaBat-7150 на глубине 2000 м при скорости хода 6 уз (≈ 3 м/с) позволили получать батиметрические данные в виде отметок глубин на дне с высокой плотностью и создавать на этой основе детальные 2D/3D геоизображения подводного рельефа.

Первичные батиметрические данные МЛЭ SeaBat-7150 рейсов ОИС «Янтарь» 2022 и 2024 гг. были обработаны специалистами ООО «Гидро-Си» с использованием современных гидрографических программных продуктов и представлены в виде файлов формата *.csar (файлы батиметрического архива фирмы CARIS).

⁶ Частичное пересмотренное представление Российской Федерации в отношении континентального шельфа Российской Федерации в юго-восточной части Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана. 2023. 16 с. https://www.un.org/depts/los/clcs_new/submissions_files/rus02_rev23/23rusrev2r.pdf/.



Рис. 3. Океанографическое исследовательское судно «Янтарь»

Fig. 3. Oceanographic Research Vessel Yantar

(<https://vk.ru/@shipyardyantar-okeanograficheskoe-issledovatel'skoe-sudno-yan-tar-v-antarkti>)

По результатам детальной батиметрической съемки из программного пакета CARIS HIPS были экспортированы полностью обработанные данные в виде отметок исправленных глубин (облако точек). При этом расстояния между отметками глубин на глубине 2000 м составило 20–25 м. Впервые были построены цифровые модели рельефа (ЦМР) с размерностью регулярной сетки 40–100 м в зависимости от глубины. На ЦМР с размерностью ячейки регулярной сетки 40 м участникам экспедиции впервые удалось визуально обнаружить поле предположительно с грязевыми вулканами на глубине 2000 м.

Съемка рельефа дна в 2024 г. выполнялась способом площадного обследования со 100%-м батиметрическим покрытием на основе использования многолучевого эхолота Teledyne Reson SeaBat 7150-B. По классификации Стандартов шестой редакции МГО S-44 (2022) съемка рельефа дна выполнялась в соответствии с требованиями ко второй категории съемок рельефа дна. Всего было выполнено 4 540 линейных километров съемки рельефа дна с использованием многолучевого эхолота SeaBat 7150-B.

При выполнении съемок рельефа дна в 2024 г. многолучевым эхолотом для вычисления значений исправленных глубин в режиме реального времени в программном обеспечении данные корректировались с учетом реального вертикального профиля распределения скорости звука в воде, а также вводились все необходимые поправки.

Для обеспечения качества съемки рельефа дна на этапе ее подготовки необходимо выполнение тестовых проверок и калибровок оборудования. В состав тестовых проверок и калибровок входит выполнение следующих операций: тестирование и калибровка систем определения планового положения и курсоуказания при стоянке судна у причала; определение постоянных поправок установочных углов излучающей и приемной антенн многолучевого эхолота на морском полигоне (калибровка многолучевого эхолота); выполнение тестовой многолучевой съемки на морском полигоне.

В 2024 г. измерения скорости распространения звука в воде проводились прямым методом с помощью зонда измерителя скорости звука Mini SVP фирмы Valeport. Точность измерения скорости звука этим прибором составляет не менее 0,1 м/с. Всего в процессе проведения съемки рельефа дна выполнено девять станций измерения скорости звука.

Измерения профиля вертикального распространения скорости звука в воде выполнялись для обеспечения качества батиметрических данных. В процессе обработки батиметрических данных проводился контроль корректности учета профиля скорости звука для батиметрических данных, в частности на контрольных пересечениях. Кроме того, проводился контрольный перерасчет профилей распространения звука в воде, чтобы удостовериться в том, что использован корректный профиль скорости звука и влияние изменений в профилях скорости распространения звука в воде

на качество данных незначительное. Постоянно проводился контроль батиметрических данных по контрольным пересечениям, чтобы удостовериться в том, что изменения скорости распространения звука не оказывают значительного влияния на изменение качества данных.

Апостериорные неопределенности исправленных глубин рассчитывались с использованием гидрографического программного обеспечения в рамках применения процедур анализа и контроля качества результатов съемки рельефа дна. Для оценки апостериорных неопределенностей исправленных глубин использовано несколько различных независимых способов:

- анализ расхождений глубин в области контрольных пересечений полос покрытия МЛЭ;
- анализ расхождений глубин в зонах наложений на батиметрических галсах 2024 гг. на основе данных, полученных с использованием МЛЭ;
- контроль качества результатов съемки рельефа дна с использованием технологии CUBE.

После окончательной обработки был проведен статистический анализ расхождений глубин цифровой модели рельефа дна с измеренными глубинами на контрольных пересечениях, полученных по данным многолучевого эхолота. Для проведения этого анализа в программном комплексе CARIS HIPS/SIPS Professional был сформирован стандартный отчет контроля качества (HIPS quality control report). Отчет контроля качества, создаваемый с учетом требований Стандарта МГО S-44 (2022), включает следующие статистические параметры: максимальное и минимальное значения расхождений глубин контрольных галсов со значениями цифровой модели рельефа дна, среднее значение расхождений глубин и стандартное отклонение расхождений. Кроме того, отчет включает процент соответствия / несоответствия расхождений допустимому интервалу, когда расхождения глубин цифровой модели и контрольного галса сравниваются с допустимыми значениями неопределенности на уровне доверительной вероятности 95 %, предписанной Стандартом МГО S-44 (2022) для второй категории съемки.

Анализ апостериорной точности результатов площадной съемки рельефа в 2024 г. выполнялся на основе данных о расхождениях глубин на контрольных галсах в зонах пересечений полос обзора МЛЭ. При этом по результатам камеральной обработки данных МЛЭ в 2024 г. для основных и контрольных галсов района по всем пересечениям получены следующие оценки:

- среднее значение расхождений между оценками глубин цифровой модели рельефа дна основных галсов и глубин контрольных галсов в зонах пересечений составило 0,03 м (количество расхождений глубин более 14,5 млн), что свидетельствует об отсутствии систематических ошибок;
- среднее значение неопределенности на уровне доверительной вероятности 95 % по всем пересечениям составило 6,03 м, или 0,24 % от глубины, что значительно меньше допустимой суммарной вертикальной неопределенности (TVU) глубины для второй категории съемок в соответствии со Стандартом МГО S-44 (2022).

Анализ соответствия расхождений в глубинах допустимому интервалу, соответствующему требованиям стандарта МГО S-44 (2020), дает основание утверждать, что расхождения в глубинах, измеренных многолучевым эхолотом на основных галсах (по результатам отчетов CARIS HIPS quality report), в 100 % случаев всех контрольных пересечений попадают в интервал, соответствующий второй категории съемок. Анализ качества площадной съемки МЛЭ, выполненной на основе статистической обработки пересечений, показал, что батиметрические данные по результатам работ 2024 г. соответствуют требованиям по точности стандарта МГО S-44 (2022) для второй категории съемки (глубины более 200 м).

Результаты анализа качества площадной съемки многолучевым эхолотом, выполненной в 2024 г., наглядно демонстрируют отсутствие систематических ошибок в площадной съемке. Полученные результаты оценки качества результатов съемки на основе технологии CUBE демонстрируют, что данные соответствуют требованиям по точности Стандарта МГО S-44 (2022) для второй категории съемок рельефа дна.

Оценка качества съемки с использованием технологии CUBE имеет преимущество, так как позволяет анализировать не только отдельные пересечения, но и охватить все полосы покрытия МЛЭ

на галсах съемки рельефа дна. Полученные результаты оценки точности данных съемки 2024 г. на основе технологии CUBE подтверждают выполнение требований Стандарта МГО S-44 (2022) с точки зрения точности исправленных глубин, а также позволяют контролировать качество обработки данных съемки рельефа дна с использованием МЛЭ, подтверждая отсутствие грубых ошибок.

Все использованные методы контроля качества батиметрических съемок 2022 и 2024 гг. показали близкие непротиворечивые результаты, подтвердив соответствие требованиям по точности второй категории съемок Стандарта МГО S-44 (2022). На основе этих данных могут быть созданы различные варианты ЦМР дна, обеспечивающие возможности 2/3D визуализации в зависимости от целей исследования и интерпретации рельефа дна.

Результаты (Results)

На основе отечественных (см. рис. 1) и доступных зарубежных данных, включая информацию регулярных сетей TID модели IBСАО версий 5 (см. рис. 2), для района юго-восточного сегмента хребта Гаккеля была создана ЦМР с размером ячейки регулярной сетки 200 м, представленная на рис. 4. Рельеф сформирован с использованием зарубежных и отечественных съемок с применением данных МЛЭ, а также отечественных ретроспективных данных, полученных с учетом автоматизированных методов геоморфологического картирования.

На батиметрической модели, представленной на рис. 4, сечение изобат составляет 200 м, в красной рамке схематически показан район площадной съемки рельефа, выполненной ОИС «Янтарь» в 2022 и 2024 гг.

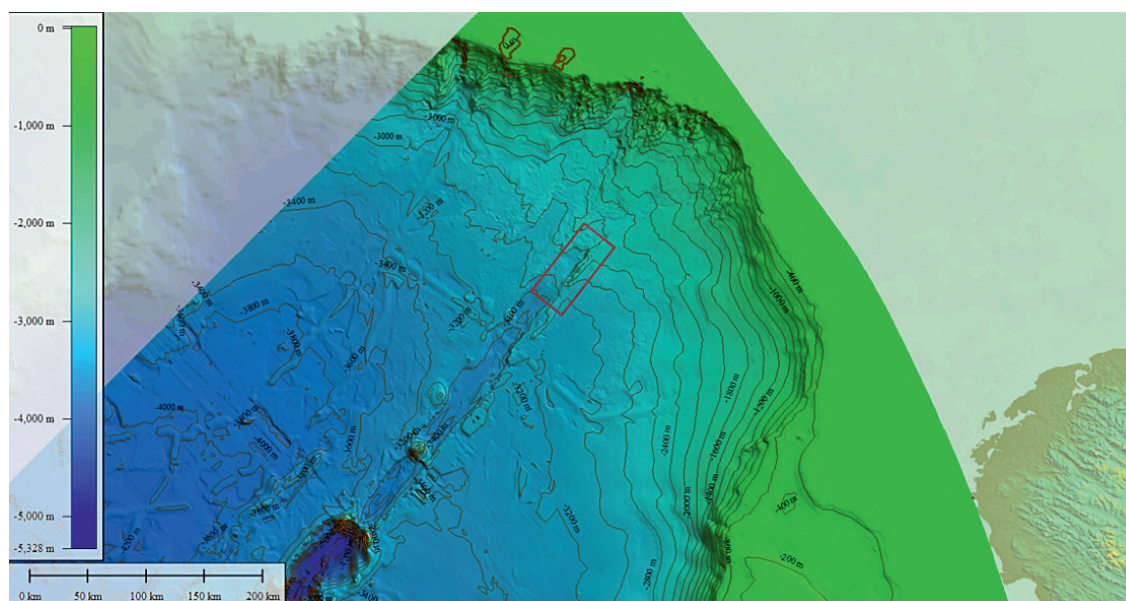


Рис. 4. Батиметрическая модель района юго-восточного сегмента хребта Гаккеля с размером ячейки регулярной сетки 200 м

Fig. 4. Bathymetric Model of the Southeastern Segment of the Gakkel Ridge with a Regular Grid Cell Size of 200 m

На рис. 5 представлены результаты батиметрической съемки 2022 и 2024 гг. в виде ЦМР с размерностью ячейки регулярной сетки 50 м и сечением изобат 200 м. ЦМР построена на основе файла отфильтрованных и исправленных отметок глубин МЛЭ.

Высокая плотность отметок глубин, полученная в процессе батиметрических съемок 2022 и 2024 гг., позволила получить детальное изображение рельефа дна на глубинах 2500–2900 м. На рис. 6 в красной рамке показан район морского дна в рифтовой долине южного продолжения хребта Гаккеля с отличительной вновь открытой формой рельефа в виде эскарпа (escarp) — практически отвесного откоса на западном фланге рифтовой долины.

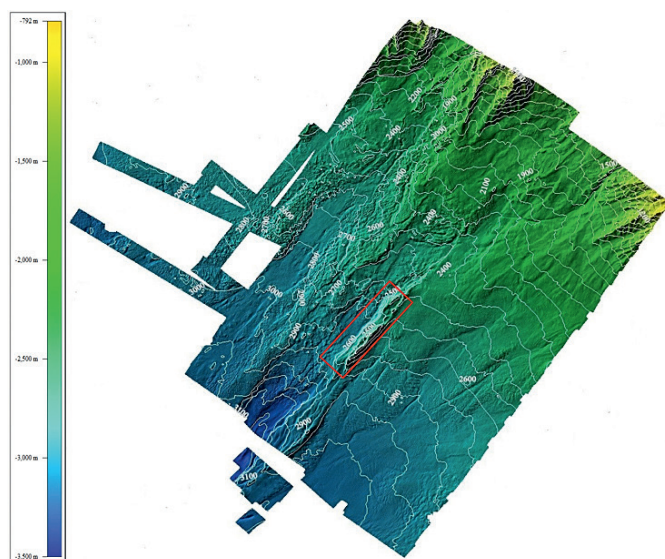


Рис. 5. ЦМР с размерностью ячейки регулярной сетки 50 м и сечением изобат 200 м

Fig. 5. Digital Terrain Model with a Regular Grid Cell Size of 50 m and a Contour Interval of 200 m

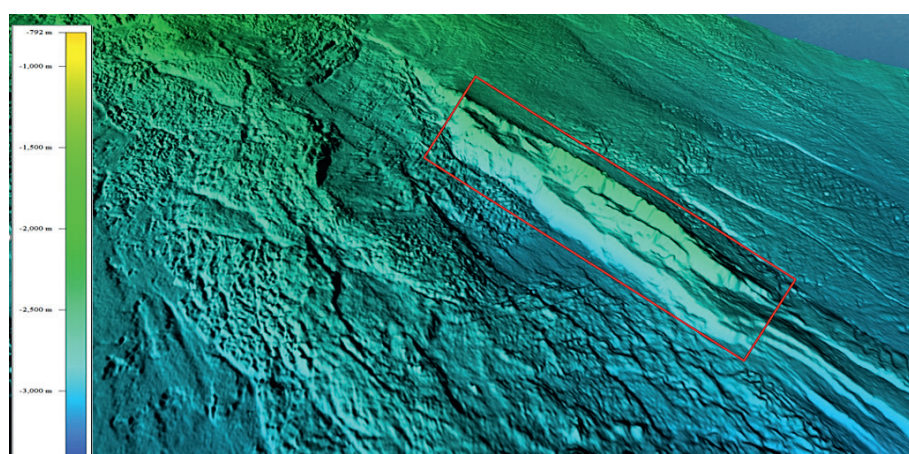


Рис. 6. Трехмерное изображение отвесного откоса (эскарпа) на западном фланге рифтовой долины южного продолжения хребта Гаккеля
Fig. 6. Three-Dimensional Image of the Escarpment on the Western Flank of the Rift Valley of the Southern Extension of the Gakkel Ridge

Предлагается дать рабочее название данного эскарпа «Эскарп Аветисова» и выйти с предложением от «ВНИИОкеангеология» в подкомиссию SCUFN ГЕБКО об официальном наименовании данной формы рельефа.

На рис. 7 представлено совмещенное 2D изображение эскарпа и батиметрический профиль, проведенный нормально к оси рифтовой долины и протяженности эскарпа в его середине. Вершины эскарпа находятся на глубинах от 2 400–2 600 м. Эскарп имеет общую длину до 26 500 м и высоту над дном рифтовой долины в пределах 350–500 м.

Современные МЛЭ наряду с получением информации в виде файлов глубин с их координатами, на основе которых возможно создание батиметрических моделей дна, могут обеспечивать регистрацию интенсивности обратного рассеивания эхо-сигнала (бекскаатер) из пятен облучения дна и тем самым создавать акустическое изображение в виде растра на основе первичных данных МЛЭ Reson SeaBat 7150-B (Teledyne), записанных в файлах формата *.s7k.

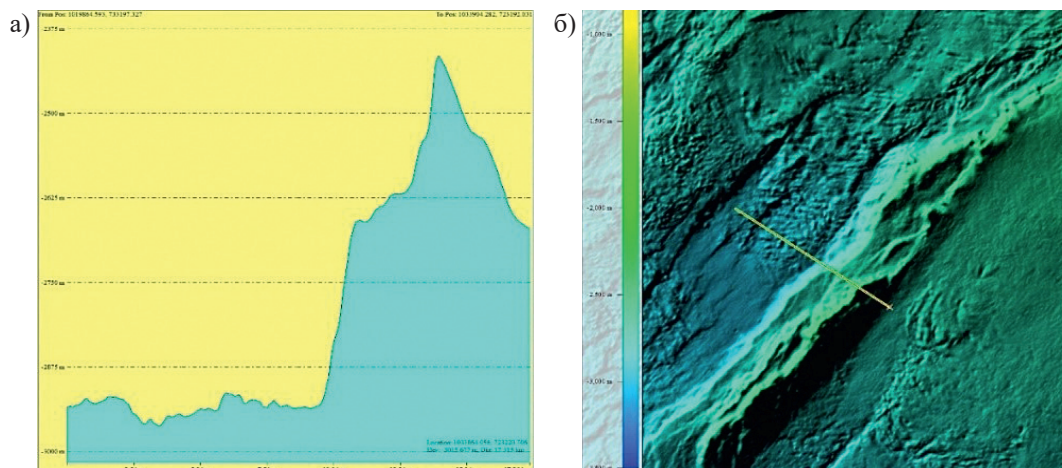


Рис. 7. Совмещенное 2D изображение эскарпа (а) и батиметрический профиль в его середине (б)
Fig. 7. Combined 2D Image of the Escarpment and a Bathymetric Profile across Its Middle Section

В процессе изучения возможности получения данных об интенсивности обратного рассеивания была освоена технология извлечения из первичных данных МЛЭ фирмы RESON (формат s7k) информации об интенсивности обратного рассеивания эхо-сигнала. Данная технология называется «опция гидролокатора бокового обзора МЛЭ» и может быть использована для дистанционного анализа донного грунта.

Работа по извлечению бэкскаттер из первичных данных МЛЭ Reson SeaBat 7150-B, полученных в рейсах 2022 и 2024 гг. ОИС «Янтарь», выполнялась в указанной последовательности:

1. Исходные файлы в формате *.s7k были загружены в программный пакет (ПП) QIMERA для обработки первичного сигнала.
2. Далее данные были экспортированы в файлы стандартного обменного батиметрического формата *.gsf.
3. Для дальнейшей обработки данных бэкскаттера использовался гидрографический ПП Fledermaus FMGT. Данные в формате *.gsf были импортированы в ПО обработки бэкскаттера.
4. В процессе дальнейшей обработки файлов *.gsf в ПП Fledermaus FMGT осуществлялось объединение отдельных полос обзора МЛЭ, содержащих данные бэкскаттера, и экспорт сформированного конечного продукта в геопроецированный растровый файл формата *.tiff.

Акустическое изображение дна района съемки ОИС «Янтарь», выполненной в 2022 и 2024 гг., дано на рис. 8, а, цифровые модели рельефа (ЦМР) приведены на рис. 8, б [8].

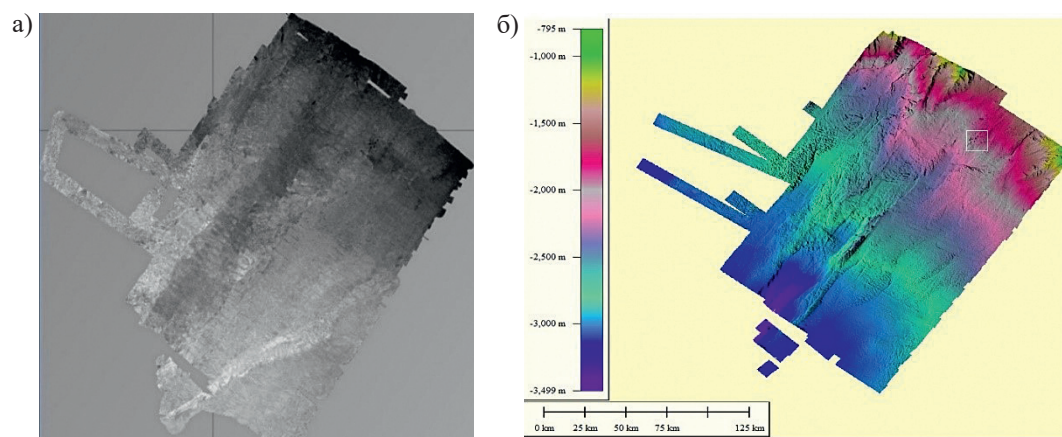


Рис. 8. Сравнение изображений дна района съемки ОИС «Янтарь» в 2022 и 2024 гг.:
а — акустическое изображение дна (растровое изображение); б — ЦМР дна (векторное изображение)
Fig. 8. Comparison of Seafloor Images of the Yantar Survey Area in 2022 and 2024:
a — Acoustic Seafloor Image (Raster Image); b — Seafloor Digital Terrain Model (Vector Image)

Анализ способов сбора данных обратного рассеивания морского дна, реализованных в современных многолучевых эхолотах, представлен в работе [7].

Автоматизированное распознавание донных грунтов, реализованное в программном пакете Fledermause FMGT, представляет собой отдельную задачу, требующую наличия образцов грунта и в данном исследовании не рассматривается.

Обсуждение (Discussion)

По результатам обработки батиметрических данных в экспедиции 2024 г. из программного пакета CARIS HIPS были экспортированы файлы формата *.csag. Данный формат, созданный фирмой TELEDYNE, объединяет данные батиметрической модели с заданной размерностью ячейки регулярной сетки глубин и все исправленные глубины с их координатами. Из этого формата могут быть экспортированы исправленные отметки всех глубин в географической системе координат. Недостатком формата *.csag является отсутствие в нем метаданных, которые необходимо представлять в цифровом виде.

При этом расстояния между отметками глубин на глубине 2000 м составило 20–25 м. Такая детальность позволяет использовать альтернативный метод создания ЦМР в виде нерегулярной треугольной сети (TIN = Triangulated Irregular Network). Модель поверхности, построенная в виде 2D/3D нерегулярной треугольной сети (TIN), наглядно показывает положение на дне малоразмерных объектов, предположительно грязевых вулканов. Модель поверхности дна в варианте 3D TIN с визуализацией положения на дне малоразмерных экзогенных объектов на поверхности морского дна показана на рис. 8 [8]. Положение 3D модели TIN, приведенной на рис. 9, показано на рис. 8, б в виде рамки белого цвета.

Возможности современных МЛЭ пятого поколения и гидрографического программного обеспечения постоянно возрастают. Современный МЛЭ способен кроме батиметрии обеспечить получение растровых акустических изображений дна (изображения МЛЭ — опция гидролокатора бокового обзора), а также регистрацию акустических данных о наличии объектов в водной толще.

Внедрение в практику новых гидроакустических технологий открывает новый этап исследования морского дна. Морские геологи нередко недооценивают возможности современных МЛЭ / БГБО и современного гидрографического программного обеспечения для получения информации о морском дне. Методы получения акустических данных об объектах в водной толще вместе с выполнением батиметрической съемки с МЛЭ рассмотрены в работе [9].

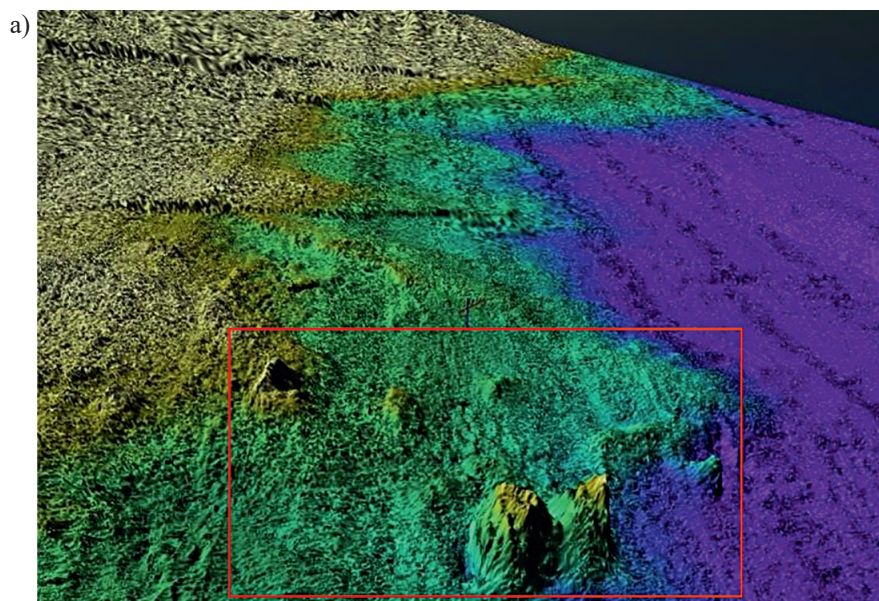


Рис. 9. (Начало). Модель поверхности в виде 3D TIN, с положением на дне малоразмерных объектов: а — общий вид района с экзогенными объектами
Fig. 9. (beginning). Surface Model as a 3D TIN Showing the Location of Small-Scale Seafloor Objects:
a — General View of the Area with Exogenous Object

б)

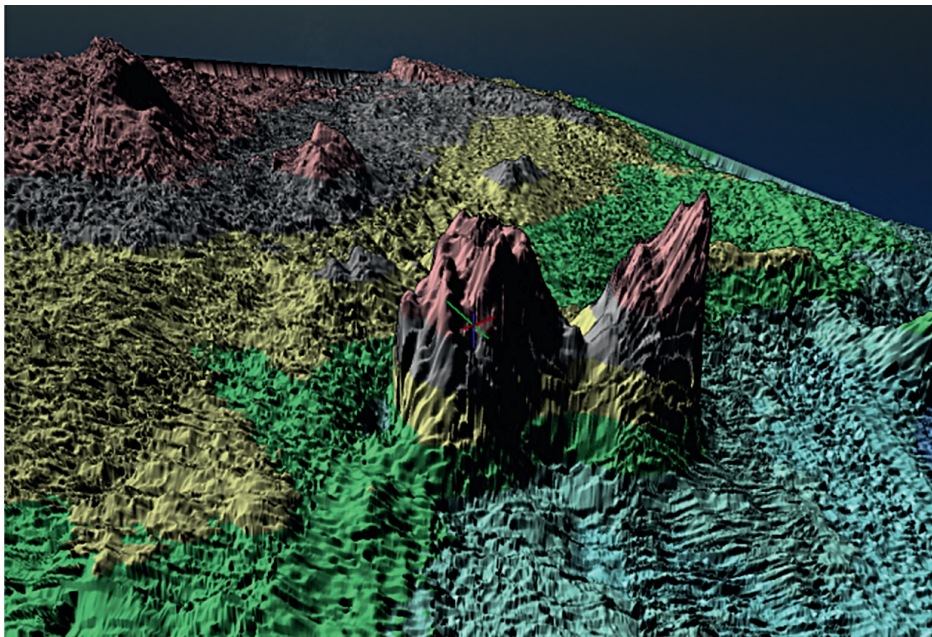


Рис. 9. (Окончание). Модель поверхности в виде 3D TIN, с положением на дне малоразмерных объектов: б — детальный вид экзогенных объектов
Fig. 9. (ending). Surface Model as a 3D TIN Showing the Location of Small-Scale Seafloor Objects: b — Detailed View of the Exogenous Objects

Одним из препятствий для выполнения эффективной батиметрической съемки для обеспечения морских геологических работ является также отсутствие современного национального стандарта. Технологическая революция в гидрографии, связанная с переходом от аналоговых к цифровым и компьютерным технологиям, вызвала необходимость создания новых норм и правил выполнения съемки рельефа, которые были выдвинуты в Стандартах Международной гидрографической организации. Проект новых Правил гидрографической съемки в целях обеспечения безопасности мореплавания разрабатывается в Управлении Навигации и океанографии Министерства обороны. Навигационно-гидрографическое и геодезическое обеспечение морских геолого-разведочных работ включало решение ряда специальных задач, нормированных в устаревшей Инструкции ИНГТО-86⁷. Поскольку в новом варианте Инструкции по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ⁸ раздел по нормированию батиметрической съемки отсутствует, ее следует актуализировать с включением правил выполнения современной батиметрической съемки с применением МЛЭ.

Отечественные батиметрические съемки 2022 и 2024 гг., выполненные в «зоне Садко» на ОИС «Янтарь» с использованием МЛЭ, показали особенности геоморфологического и геологического строения этой зоны [10]. Детальная площадная батиметрическая съемка в этом районе выполнялась впервые.

Использование ОИС «Янтарь» для геологических целей наиболее удобно, поскольку судно является носителем глубоководного обитаемого подводного аппарата и телеуправляемого необитаемого подводного аппарата, имеет гидроакустическую навигационную систему и систему динамического позиционирования, которые позволяют эффективно эксплуатировать судно для различных исследовательских целей, включая морские геологические работы.

⁷ Инструкция по навигационно- гидрографическому и геодезическому обеспечению морских геологоразведочных работ (ИНГТО-86). Министерство геологии СССР. М., 1986. 104 с.

⁸ Инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ (утв. Министерством природных ресурсов РФ 3 декабря 1996 г.) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293763/4293763666.htm> (дата обращения: 01.4.2026).

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Детальное изучение рельефа дна является одним из основных условий успешного проведения морских геологоразведочных работ.
2. Современные гидроакустические технологии МЛЭ и ГБГО и гидрографическое программное обеспечение позволяют получать детальную информацию о морском дне. Данная информация требует необходимой обработки, включая всестороннюю оценку качества с целью получения достоверных цифровых моделей рельефа и акустических изображений дна.
3. В 2022 и 2024 гг. на ОИС «Янтарь» была выполнена детальная съемка рельефа дна с использованием МЛЭ SeaBat-7150 и получены батиметрическая модель, акустическое изображение дна, а также все исправленные глубины с точностью, регламентируемой Стандартами S-44 МГО.
4. В случае использования МЛЭ для обеспечения морских геологических работ рекомендуется при выполнении окончательной обработки первичных данных формировать акустическое изображение дна (опция ГБО МЛЭ), интерпретация которого дает дополнительную актуальную информацию.
5. При выполнении современной батиметрической съемки для обеспечения морских геологических работ с использованием гидрографических информационных технологий фирмы TELEDYNE следует архивировать результаты съемки рельефа в файлах формата*.csar (так называемый архив CASIS), обеспечивающих возможность сохранения всех исправленных отметок глубин в географической системе координат.
6. Новые данные съемок 2022 и 2024 гг. позволили уточнить детали строения участка рифтовой долины хребта Гаккеля к юго-востоку от впадины Киселева и прилегающих к ней площадей, объединенных рабочим названием «зона Садко». Были конкретизированы границы, особенности и размеры грядовых и долинных форм, выявлены несколько генераций оползневых тел, уточнено их распространение, что обеспечило поддержку нового частичного Представления РФ на расширенный континентальный шельф в юго-восточной части Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана.
7. В ходе проведенных работ в очередной раз проявилась недостаточность отечественной топонимической базы в Арктическом бассейне. Отсутствие необходимых географических названий затрудняет географическую привязку и описание результатов работ. Требуют своего наименования новые и давно известные объекты морского дна, в названиях которых необходимо увековечить имена представителей предшествующих поколений самоотверженных исследователей Российской Арктики.
8. Отсутствие в Российской Федерации норм и правил выполнения площадных батиметрических съемок для обеспечения морских геологических работ затрудняет внедрение новых IT-технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пискарев А. Л. Арктический бассейн (геология и морфология): монография / под ред. В. Д. Каминского / А. Л. Пискарев. — СПб.: Изд-во ВНИИОкеангеология, 2017. — 291 с. — EDN JLNMUJ.
2. Гусев Е. А. Прилаптевоморское окончание хребта Гаккеля / Е. А. Гусев, А. В. Зайончек, М. В. Мэннис [и др.] // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. — СПб.: ВНИИОкеангеология. 2002. — Вып. 4. — С. 40–54. — EDN UZURFR.
3. Пискарев А. Л. Строение зоны перехода шельф моря Лаптевых–Евразийский бассейн (Северный Ледовитый океан) / А. Л. Пискарев, Г. П. Аветисов, А. А. Киреев [и др.] // Геотектоника. — 2018. — № 6. — С. 3–24. — EDN VKZXYJ. — DOI: 10.1134/S0016853X18060061.
4. Jakobsson M. Polar Region Bathymetry: Critical Knowledge for the Prediction of Global Sea Level Rise / M. Jakobsson, L. A. Mayer // Frontiers in Marine Science. — 2022. — Vol. 8. — 788724. — EDN CUUDTK. — DOI: 10.3389/fmars.2021.788724.
5. Jakobsson M. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 5.0 / M. Jakobsson, R. Mohammad, M. Karlsson, S. Salas-Romero [et al] // Scientific Data. — 2024. — Vol. 11 (1420). — EDN ZRNVJL. — DOI: 10.1038/s41597-024-04278-w.

6. Каминский Д. В. Новые данные о строении Лаптевоморского фланга хребта Гаккеля (Северный Ледовитый океан) / Д. В. Каминский, Н. П. Чамов, Д. М. Жилин [и др.] // Литология и полезные ископаемые. — 2024. — № 6. — С. 634–647. — EDN WVQJQL. — DOI: 10.31857/S0024497X24060028.

7. Колосков Е. Н. Способы сбора данных обратного рассеивания морского дна, реализованные в современных многолучевых эхолотах / Е. Н. Колосков, Б. А. Корнипаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6(40). — С. 96–105. — EDN XHLRKY. — DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-96-105.

8. Зинченко А. Г. Новые данные о рельефе прилаптевоморского сектора континентального склона Евразийского бассейна (по результатам батиметрических съемок 2022 и 2024 гг.) / А. Г. Зинченко, С. В. Егоров, Ю. Г. Фирсов [и др.] // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. Вып. 11. — С. 146–157. — EDN KLOYKM. — DOI: 10.24412/2687-1092-2024-11-146-157.

9. Колосков Е. Н. Применение современных гидрографических технологий для изучения рельефа и донного газопоявления в северных морях России / Е. Н. Колосков, Ю. Г. Фирсов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 54–62. — EDN TWPZAN. — DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-54-62.

10. Каминский Д. В. Первые результаты исследований области сочленения хребта Гаккеля с шельфом моря Лаптевых в экспедиции «Арктика-2024» / Д. В. Каминский, А. А. Крылов, В. Ю. Татаринов [и др.] // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. — 2024. — Вып. 11. — С. 166–175. — EDN LXLXHZ. — DOI: 10.24412/2687-1092-2024-11-166-175.

REFERENCES

1. Piskarev, A. L., V. A. Poselov, V. D. Kaminskiy et al. *Arctic basin (geology and morphology)*. Sankt-Peterburg : Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie "Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut geologii i mineral'nykh resursov Mirovogo okeana imeni akademika I.S. Gramberga", 2017: 291.

2. Gusev, E. A., A. V. Zayonchek, M. V. Mennis et al. "The end of the gakkel ridge in the laptev sea." *Geologogefizicheskie kharakteristiki litosfery arkticheskogo regiona* Sankt-Peterburg : VNIIOkeangeologiya, 2002: 40–54.

3. Piskarev, A. L., G. P. Avetisov and A. A. Kireev et al. "Structure of the Laptev Sea Shelf–Eurasian Basin Transition Zone (Arctic Ocean)." *Geotectonics* 52.6 (2018): 589–608. DOI: 10.1134/S0016852118060067.

4. Jakobsson, M. and L. A. Mayer. "Polar Region Bathymetry: Critical Knowledge for the Prediction of Global Sea Level Rise." *Frontiers in Marine Science* Volume 8 - 2021 (2022). DOI: 10.3389/fmars.2021.788724.

5. Jakobsson, M., L. Mayer et al. "The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 5.0." *Scientific Data* 11.1 (2024): 1420. DOI: 10.1038/s41597-024-04278-w.

6. Kaminskiy, D. V., N. P. Chamov, D. M. Zhilin et al. "Novye dannye o stroenii Laptevomorskogo flanga khrebta Gakkelya (Severnyy Ledovityy okean)." *Litologiya i poleznye iskopaemye* 6 (2024): 634–647. DOI: 10.31857/S0024497X24060028.

7. Koloskov, E. N. and B. A. Kornipae. "Data backscatter seabed image in modern multibeam echo sounders." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(40) (2016): 96–105. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-96-105.

8. Zinchenko, A. G., S. V. Egorov, Yu. G. Firsov et al. "New data on the relief of the laptev sea sector of the eurasian basin continental slope (based on the results of bathymetric surveys in 2022 and 2024)." *Relief and Quaternary Deposits of The Arctic, Subarctic and North-West Russia* 11 (2024): 146–157. DOI: 10.24412/2687-1092-2024-11-146-157.

9. Koloskov, E. N. and Yu. G. Firsov. "Primenenie sovremennykh gidrograficheskikh tekhnologiy dlya izucheniya rel'efa i donnogo gazoproyavleniya v severnykh moryakh Rossii ." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 54–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-54-62.

10. Kaminskiy, D. V., A. A. Krylov, V. Yu. Tatarinov et al. "The first results of research on the connection of the gakkel ridge with the laptev sea shelf in the arctic-2024 expedition." *Relief and Quaternary Deposits of The Arctic, Subarctic and North-West Russia* 11 (2024): 166–175. DOI: 10.24412/2687-1092-2024-11-166-175.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фирсов Юрий Георгиевич —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

Иванов Михаил Владимирович —

ведущий инженер
ФГБУ «ВНИИОкеангеология»,
190121, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, Английский пр., д. 1
e-mail: falcon6565@mail.ru

Колосков Евгений Николаевич —

ведущий инженер
ФГБУ «ВНИИОкеангеология»,
190121, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, Английский пр., д. 1
e-mail: evgenklskv@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Firsov, Yury G. —

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7, Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

Ivanov, Michail V. —

Leading Engineer
FSBI “VNIIOkeangeologiya”
1, Anglisky av., St. Petersburg,
190121, Russian Federation
e-mail: falcon6565@mail.ru

Koloskov, Evgeniy N. —

Leading Engineer
FSBI “VNIIOkeangeologiya”
1, Anglisky av., St. Petersburg,
190121, Russian Federation
e-mail: evgenklskv@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 14 мая 2026 г.

Received: May 14, 2026.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРУЖЕННОСТИ СИСТЕМЫ
МОРСКИХ ПАССАЖИРСКИХ ПАРОМНЫХ ПРИЧАЛОВ В РЕГИОНЕ МОРЯ
С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ
И ИЗМЕНЕНИЙ В МАРШРУТНЫХ РЕГИОНАЛЬНЫХ СЕТЯХ**

Н. Н. Майоров, М. Р. Язвенко

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования является одна из наиболее актуальных и сложных задач, а именно оценка загруженности причалов терминалов в регионе при формировании различных вариантов маршрутных сетей и учета изменений под воздействием внешних факторов. Отмечается, что для решения этой проблемы важно создать большие данные, которые позволяют принимать обоснованные решения о загруженности пассажирских причалов и создании новых паромных линий, основываясь на информации, полученной от цифровых двойников портов и прогнозировании различных сценариев паромных и круизных маршрутов. В качестве объекта исследования выбраны морские пассажирские порты и терминалы в регионе Балтийского моря. Обоснована необходимость многосценарного моделирования паромных судов с учетом особенностей причалов и анализа данных за навигацию. Для решения этой задачи разработана новая цифровая транспортная модель, которая описывает взаимодействие группы морских терминалов и паромных линий, что позволяет оптимизировать процесс обслуживания паромных судов. Также предложен новый метод маршрутизации паромных перевозок в регионе с использованием теории графов для выбора маршрутов круизных линий. В исследовании применяются методы многосценарного моделирования с учетом различных интенсивностей и инфраструктурных особенностей пассажирских портов. Основу исследования составил анализ реальных данных о пассажирских портах Балтийского моря и интенсивности движения паромов, что позволяет оценить эффективность предложенной модели после появления новых паромных линий в портах, таких как Санкт-Петербург, Хельсинки, Таллин и Стокгольм. Экспериментально представлены результаты воздействия введения новой паромной линии на загрузку причалов этих портов. Разработанный программный модуль цифровой модели порта позволяет получать данные для принятия решений как в операционном управлении морскими пассажирскими портами, так и для прогнозирования их развития. Изученный имитационный инструментарий помогает оценить работу системы морских пассажирских портов и определить загруженность причалов в зависимости от изменений маршрутной сети, что позволяет более эффективно решать задачи принятия решений в условиях неопределенности. На основе многосценарных данных о загруженности причалов и изменениях в маршрутных сетях открываются возможности для проведения оптимизационных экспериментов, что поможет в дальнейшем определить стратегию развития морского пассажирского порта для лиц, принимающих решения.

Ключевые слова: паромные линии, приоритетная очередь, система массового обслуживания, имитационное моделирование, морской пассажирский порт, принятие решений, пассажирский порт, паромные суда, региональные особенности, увеличение пассажиропотока, модернизация портовой инфраструктуры.

Для цитирования:

Майоров, Н. Н. Исследование загруженности системы морских пассажирских паромных причалов в регионе моря с учетом динамического формирования и изменений в маршрутных региональных сетях / Н. Н. Майоров, М. Р. Язвенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 4. С. 580–592. EDN UILFBG. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-580-592.

**ASSESSMENT OF SEA PASSENGER FERRY BERTH OCCUPANCY UNDER DYNAMIC
FORMATION AND CHANGES IN REGIONAL ROUTE NETWORKS**

N. N. Maiorov, M. R. Yazvenko

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

The study addresses the assessment of berth occupancy at sea passenger terminals under different configurations of regional route networks and their changes caused by external factors. The relevance of the problem is associated with the need to generate large data sets that can support informed decisions on passenger berth utilization and the development of new ferry lines using information obtained from digital port twins and forecasts of different ferry and cruise route scenarios. Sea passenger ports and terminals in the Baltic Sea region were selected as the object of the study. The need for multi-scenario simulation of ferry traffic taking into account berth characteristics and navigation-period data is substantiated. A new digital transport model describing the interaction between a group of sea terminals and ferry lines was developed to optimize ferry vessel handling. A new method for routing regional ferry services based on graph theory is also proposed for selecting cruise and ferry route options. The study applies multi-scenario simulation methods considering different traffic intensities and infrastructure characteristics of passenger ports. The model is based on actual data on Baltic Sea passenger ports and ferry traffic intensity. Its effectiveness is evaluated for the introduction of new ferry services involving St. Petersburg, Helsinki, Tallinn, and Stockholm. The effect of a new ferry line on berth occupancy at these ports is demonstrated experimentally. The developed software module of the digital port model provides data for both operational decision-making and forecasting the development of sea passenger ports. The simulation tools make it possible to assess the operation of a system of sea passenger ports and determine berth occupancy depending on changes in the route network. Multi-scenario data on berth occupancy and route-network changes can subsequently be used in optimization experiments to support strategic decisions on the development of sea passenger ports.

Keywords: ferry lines, priority queue, queueing system, simulation modelling, sea passenger port, decision-making, passenger port, ferry vessels, regional characteristics, passenger traffic growth, port infrastructure modernization.

For citation:

Maiorov, Nikolai N. and M. R. Yazvenko. "Assessment of sea passenger ferry berth occupancy under dynamic formation and changes in regional route networks" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.4 (2026): 580–592. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-580-592.

Введение (Introduction)

В настоящее время происходит изменение подходов к описанию процессов и принятию решений по маршрутизации паромных перевозок ввиду возрастания конкуренции на рынке, изменчивого динамического влияния внешней среды, а также поиска инструментальных цифровых средств, позволяющих решать задачу прогнозирования развития и формировать большие данные для анализа различных сценариев. Для лиц, принимающих решение, актуальным вопросом является решение задачи формирования больших данных при исследовании или прогнозировании различных вариантов изменений в маршрутных круизных и паромных сетях в регионе моря. При этом необходимо рассматривать не каждый терминал по отдельности с системой причалов, а комплексно систему морских пассажирских портов.

Руководители портов, принимающие решения, и судовладельцы, которые хотят привлечь большее количество пассажиров при условии наличия устоявшихся маршрутов в регионе моря и предложить новую паромную линию, находятся в ситуации неопределенности, располагая лишь ограниченными данными на навигацию. Под воздействием многих факторов и условий внешней среды для системы морских паромных линий возникают задачи, формирующие новые требования по операционной работе и прогнозированию развития. Для этого необходим переход от рассмотрения отдельных доступных к заходам пассажирских портов к исследованию взаимодействия технических систем «морская паромная / круизная линия – система морских пассажирских портов – региональная (городская) транспортная инфраструктура» для региона моря. Комплексная модель маршрутизации грузовых потоков с учетом особенностей региона, в том числе модель с предложением выделения отдельных маршрутных сегментов в регионе моря, представлена в статьях [1–3], а также модель приема паромных судов пассажирским портом, представленная в [4], позволяют сформировать необходимый объем данных для прогнозирования эффективности новой имитационной транспортной модели.

При введении нового маршрута или изменений под влиянием внешней среды набор данных и оценку различных сценариев эффективности новой паромной линии необходимо получать

с использованием многосценарного многопараметрического моделирования процессов на основе цифровых моделей и цифровых транспортных двойников [5–7]. Учет стохастического влияния внешней среды на морские пассажирские терминалы и линии конкурентов позволяет решать проблему стратегического развития для максимизации пассажиропотока, а также изменения положения круизной компании в регионе моря и на рынке пассажирских перевозок.

В исследовании представлены результаты разработки программного имитационного модуля, позволяющего выполнить многокритериальное моделирование загрузки группы причалов морских пассажирских портов в регионе моря одновременно (как с учетом использования планируемых данных на навигацию, так и при внесении изменений в маршрутные сети), для определения целесообразности вывода нового паромного маршрута на рынок паромных перевозок и исследования загруженности причалов системы портов, а также оценки положения порта в регионе.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Европа имеет статус наиболее развитого рынка паромных перевозок. Наибольшая интенсивность наблюдается в акватории Балтийского моря, где действуют многочисленные международные маршруты, соединяющие Скандинавию, страны Балтии и континентальную Европу. Значительный объем перевозок также осуществляется через пролив Ла-Манш, соединяющий Великобританию с Францией, и Средиземное море, где большая часть линий соединяет Италию с многочисленными островами. Регион Балтийского моря отличается наиболее интенсивным паромным сообщением. Исторически сформировавшиеся ключевые международные маршруты связывают страны Скандинавии, Балтии и континентальной Европы: Таллинн (Эстония) – Хельсинки (Финляндия), Стокгольм (Швеция) – Хельсинки, Рига (Латвия) – Стокгольм, а также множество маршрутов между Швецией и Польшей (Гданьск / Гдыня – Нюнесхамн / Карлскруна), Швецией и Германией (Треллеборг – Росток), Германией и Данией (Росток – Гедсер).

Учитывая пассажиропоток в каждом порту отправления и назначения, при достаточном количестве пассажиров, ожидающих перевозки, необходим оптимальный план транспортировки (маршрутной паромной сети) для минимизации транспортных издержек и максимизации прибыли, максимизации пассажиропотока. Данное условие направлено на определение оптимальной вместимости пассажирского судна или оценки эффективности маршрута и паромной линии. Задача оптимальной транспортировки из нескольких морских портов отправления (источников) в несколько пунктов назначения (приемников) является сложной (*NP*-трудной) задачей оптимизации [8].

Все пассажиры группируются по их направлению движения (например, Хельсинки – Таллинн или Таллинн – Хельсинки) на целочисленные группы $i = 1, 2, \dots, N$, где N — количество возможных направлений движения пассажиров и выбора маршрутных направлений. Судно с заданной вместимостью совершает рейсы из первого в последний порт, обозначенный $M + 1$ на рис. 1, с возможным набором промежуточных портов, обозначенных K . Цель состоит в том, чтобы найти стратегию максимальной загрузки круиза и последующего движения по маршруту через систему портов, которая минимизирует общие затраты на весь маршрут, состоящий из M портов на пути ($M \leq K$). Необходимо принять условие, что имеет место ситуация увеличения количества пассажиров круиза при прохождении системы морских пассажирских портов.

Для решения данной задачи используются методы поиска наименьшего пути в графе с несколькими начальными и конечными пунктами [1]. Некоторые порты имеют ограничения на прием паромного или круизного судна, многие порты являются промежуточными, в которых существующий спрос на пассажиров не обеспечивает прибыльности маршруту. Движение судов принимается от одного порта до другого, но в реальности возможны любые комбинации начальных и конечных пунктов, а сам маршрут, как правило, кольцевой. На рис. 1 вершины символизируют загрузку судна по каждой из групп пассажиров после погрузки в порту M . Соединения между вершинами представляют пассажиро- и грузооборот между этими морскими пассажирскими портами.

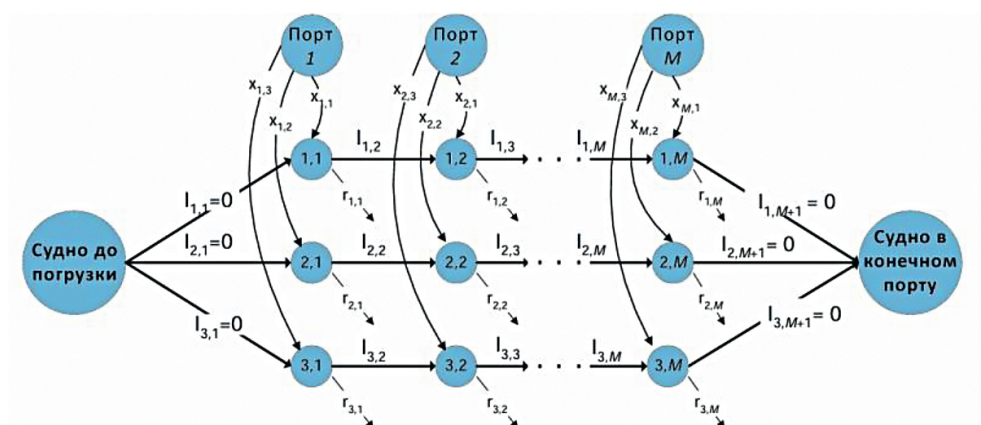


Рис. 1. Задача формирования маршрута паромного судна в виде потокового ориентированного ациклического графа
Fig. 1. Ferry Vessel Route Formation Problem Represented as a Flow-Based Directed Acyclic Graph

На рис. 1 использованы следующие условные обозначения:

вершины i, j — индексы загрузки судна (i — группа пассажиров; j — порт, в котором находится судно на данном этапе алгоритма);

m — индекс порта, в которой заходит судно ($1, 2, \dots, M$);

$x_{i,m}$ — количество пассажиров, поднявшихся на борт судна в порту m , относящихся к группе i ;

$L_{xi,m}$ — ограничения по количеству пассажиров в порту по i -группе;

$I_{i,m}$ — количество пассажиров группы i на судне, в момент захода в порт m ;

$r_{i,m}$ — количество пассажиров группы i , покинувших судно в порту m : перед погрузкой в первом порту $I_{i,m} = 0$; после последнего порта $I_{i,M+1} = 0$ для $i = 1, \dots, N$.

Математическая модель приведенной на рис. 1 задачи формирования маршрута представлена в виде следующей формулы:

$$I_m = \sum_{i=1}^N x_{i,m} - r_{i,m}, \quad (1)$$

где $i = 1, \dots, N$; $m = 1, \dots, M$.

Пусть C_m — это количество возможных вариантов загрузки групп пассажиров (погрузочных единиц) в порту M . Тогда, если принять, что до выхода судна на линию и загрузки в первом порту, и что после посещения последнего порта судно должно быть пустым, т. е. $C_1 = C_{m+1} = 1$, то общее число возможных вариантов погрузки судна при работе на паромной линии описывается формулой

$$C_p = \sum_{m=1}^{M+1} C_m. \quad (2)$$

Количество возможных вариантов соединения погрузочных единиц, т. е. перевозки из одного пассажирского порта в другой, описывается формулой

$$N_d = \sum_{i=1}^M C_i \left[\sum_{j=i+1}^{M+1} C_j \right]. \quad (3)$$

Соединение двух последующих погрузочных единиц в соседних портах можно описать экономически или в виде суммарных издержек на перевозку, или в виде общей прибыли по перемещению этой группы пассажиров между двумя портами. Общая прибыль рассчитывается как разница выручки от перевозки и расходов на ее совершение и обозначается $d_{i,j}(C_i, C_j)$. Таким образом, из всех соединений погрузочных единиц можно составить один большой граф и решить задачу маршрутизации и погрузки с помощью алгоритмов поиска наименьшего пути в графе (рис. 2).

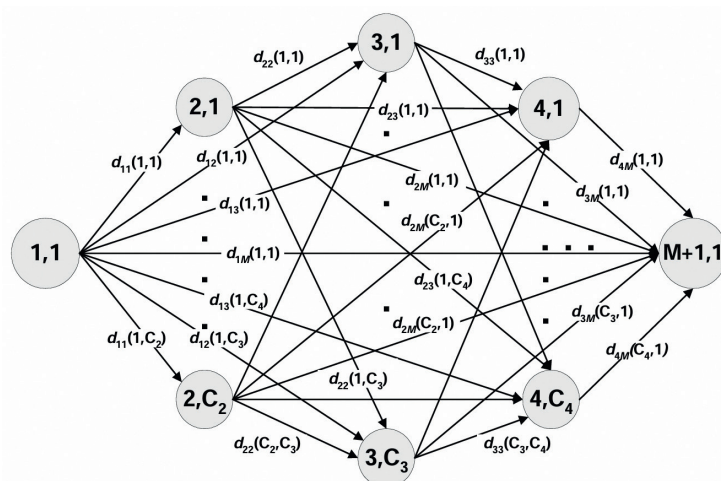


Рис. 2. Задача маршрутизации морских паромных перевозок
в виде графа для решения методами поиска кратчайшего пути
Fig. 2. Sea Ferry Routing Problem Represented as a Graph for Shortest-Path Methods

В ходе исследований была разработана имитационная модель приема паромов в морском пассажирском порту. Модель, реализованная на основе теории массового обслуживания с приоритетами, способна принимать одновременно паромные линии и круизные суда, ее подробное описание приведено в работах [1, 9–11]. Поскольку на рассматриваемых далее паромных линиях работают только грузопассажирские паромы, требующие специально оборудованных аппарелями причалов, а среди круизных судов, рассмотренных в исследовании [12], только пассажирские суда, круизные (пассажирские) причалы в портах в работе рассматриваться не будут. С помощью данной модели можно определить загрузку причалов и группы связанных морских пассажирских портов, в регионе моря.

Результаты (Results)

В ходе исследования был рассмотрен модельный пример, в котором показана необходимость осуществления международных морских паромных перевозок в морском пассажирском порту Санкт-Петербург (АО «Пассажирский Порт Санкт-Петербург «Морской фасад»), и, соответственно, необходимость восстановления паромного сообщения. Прогноз пассажирооборота морских паромных сообщений оценивался в 2019 г. в Санкт-Петербурге [13] в 1,1 млн пассажиров.

Учитывая существующую в мире паромных перевозок тенденцию к возвращению общего пассажирооборота в 2026–2027 гг. к показателям 2019 г. [14], можно считать прогнозируемую ранее цифру актуальной в случае возвращения Санкт-Петербурга на рынок паромных перевозок. Граф существующих наиболее популярных с включением Санкт-Петербурга паромных линий региона Финского залива с указанием расстояний представлен на рис. 3.

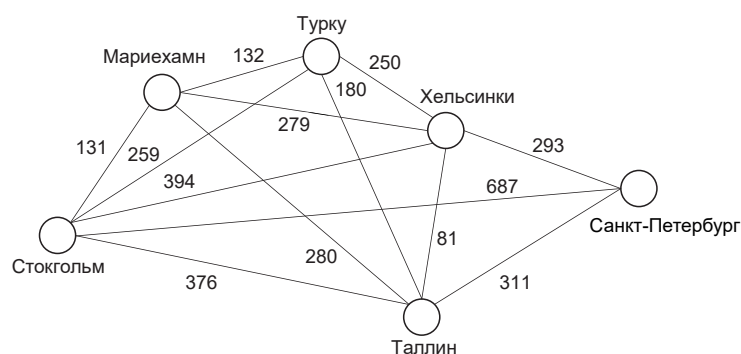


Рис. 3. Граф морских паромных линий Финского залива и близлежащего района Балтийского моря
Fig. 3. Graph of Sea Ferry Routes in the Gulf of Finland and the Adjacent Baltic Sea Area

С помощью рассмотренного алгоритма решения задачи маршрутизации с использованием теории графов был определен допустимый маршрут движения парома в регионе: Санкт-Петербург – Хельсинки – Стокгольм – Таллинн – Санкт-Петербург. Данный маршрут до 2020 г. выполнялся морским паромным судном Princess Anastasia. Архивное расписание парома, представленное в табл. 1, дает информацию о длительности маршрута по времени, которое составляет три дня, для дальнейшего моделирования.

Таблица 1

Архивное расписание парома SPL Princess Anastasia

Table 1

Archived Schedule of the SPL Princess Anastasia Ferry

Направление	Отправление	Прибытие
Санкт-Петербург – Хельсинки	19:00	8:00
Хельсинки – Стокгольм	16:00	8:00
Стокгольм – Таллинн	18:00	11:30
Таллинн – Санкт-Петербург	19:00	9:30

В ходе исследования были проведены серии экспериментов над моделью выделенного региона Балтийского моря для различных сценариев по каждому из участвующих в маршруте морских пассажирских портов. Разработанный модуль «паромные линии региона моря» отображает движение паромов на линиях, полученных с помощью представления графа рис. 3 в среде моделирования (рис. 4).

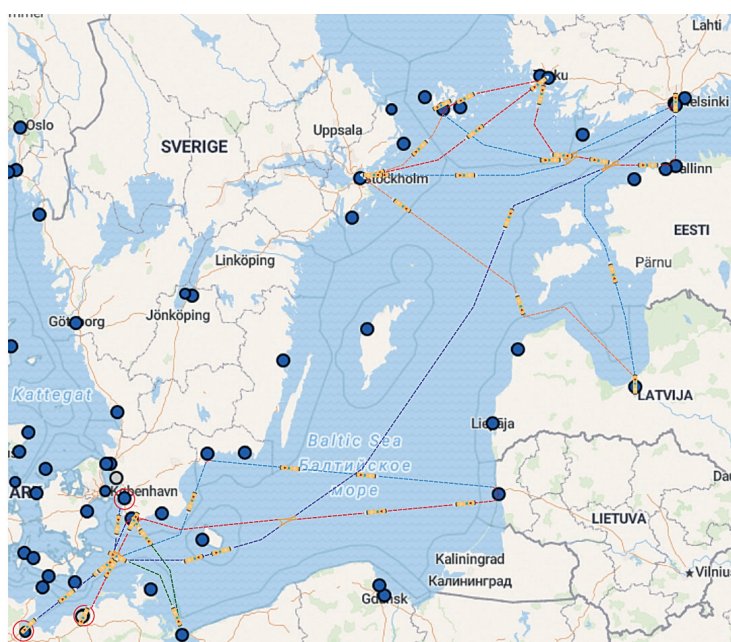


Рис. 4. Оконная форма графа морских паромных линий Финского залива и близлежащего района Балтийского моря в среде моделирования Anylogic [15]

Fig. 4. Window View of the Sea Ferry Route Graph for the Gulf of Finland and the Adjacent Baltic Sea Area in the AnyLogic Simulation Environment

Разработанный новый программный модуль приема потока паромных и круизных судов в портах поддерживает прием не только паромов, но и круизных судов. В рамках данного исследования будет проводиться моделирование только потока паромных судов и инфраструктуры портов для его обслуживания (рис. 5).

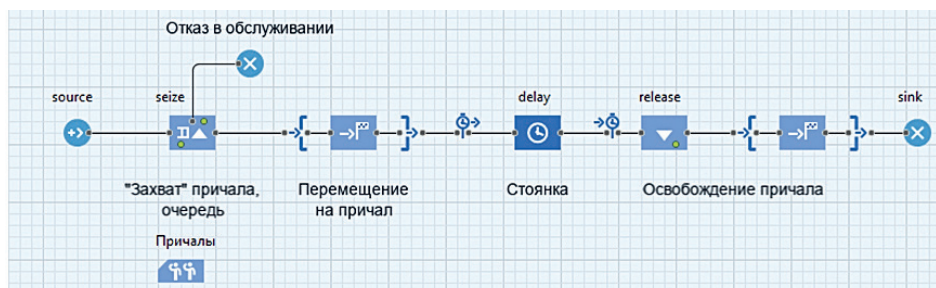


Рис. 5. Схема дискретно-событийного модуля приема судна в порту
Fig. 5. Diagram of the Discrete-Event Module for Vessel Arrival Handling at a Port

Рассмотрим формируемые новые сценарии работы морских пассажирских портов (рис. 6). В первом сценарии моделирование осуществлялось на основе реальных данных о месячной интенсивности заходов паромов в выбранные для исследования порты Балтийского моря. Второй сценарий показывает изменение в работе портов при введении одного парома на предлагаемую линию, третий рассматривает изменения при введении трех паромов на линию для обеспечения ежедневного движения. По полученным экспериментальным данным можно судить о возможности морских пассажирских портов по приему судов на предлагаемой линии.



Рис. 6. Пример оконной формы модели причалов
на основе данных об инфраструктуре портов г. Хельсинки
Fig. 6. Example of the Berth Model Window Based on Helsinki Port Infrastructure Data

Во всех четырех городах (выбранных портах) причалы для приема паромных судов расположены на нескольких терминалах в разных частях города. Как правило, это исторические морские вокзалы и современные специализированные пассажирские терминалы. Причалы имеют различную допустимую длину и осадку принимаемого судна, что можно отразить средствами моделирования, но в данном исследовании дифференциация размеров паромов не применяется (табл. 2).

Таблица 2

Количество причалов для приема паромных судов

Table 2

Number of Berths for Ferry Vessels

Город	Количество причалов
Санкт-Петербург	3
Хельсинки	11
Стокгольм	6
Таллинн	9

Расписание паромных линий известно и находится в открытых источниках. При запуске одного парома на маршрут паром будет заходить в порты раз в три дня, т. е. 2,33 раза в неделю или 10 раз в месяц. При запуске ежедневного движения интенсивность движения составит семь судозаходов в неделю и 30 судозаходов в месяц (табл. 3).

Таблица 3

Количество заходов паромных судов в порты

Table 3

Number of Ferry Vessel Calls at Ports

Город	Количество судозаходов за неделю	Количество судозаходов за месяц
Санкт-Петербург	0	0
Хельсинки	114	505
Стокгольм	75	332
Таллинн	91	403

По результатам моделирования формируются данные и производится оценка загрузки причалов портов на рассматриваемом маршруте (табл. 4–6).

Таблица 4

Результаты моделирования при существующих условиях

Table 4

Simulation Results under Existing Conditions

Город	Санкт-Петербург	Хельсинки	Стокгольм	Таллинн
Месячная интенсивность паромного движения	0	505	332	403
Коэффициент загрузки причалов	0	0,273	0,388	0,275
Среднее число занятых причалов	0	3	1,98	2,5
Очередь (средняя)	0	0	0	0

Таблица 5

Результаты моделирования при выводе одного парома на линию

Table 5

Simulation Results with One Ferry Introduced on the Route

Город	Санкт-Петербург	Хельсинки	Стокгольм	Таллинн
Месячная интенсивность паромного движения	10	515	342	413
Коэффициент загрузки причалов	0,0273	0,286	0,422	0,286
Среднее число занятых причалов	0,083	3,153	2,105	2,58
Очередь (средняя)	0	0	0,025	0

Таблица 6

Результаты моделирования при выводе ежедневного паромного сообщения

Table 6

Simulation Results with Daily Ferry Service Introduced

Город	Санкт-Петербург	Хельсинки	Стокгольм	Таллинн
Месячная интенсивность паромного движения	30	535	362	433
Коэффициент загрузки причалов	0,062	0,3	0,457	0,298
Среднее число занятых причалов	0,19	3,307	2,27	2,68
Очередь (средняя)	0	0	0,035	0

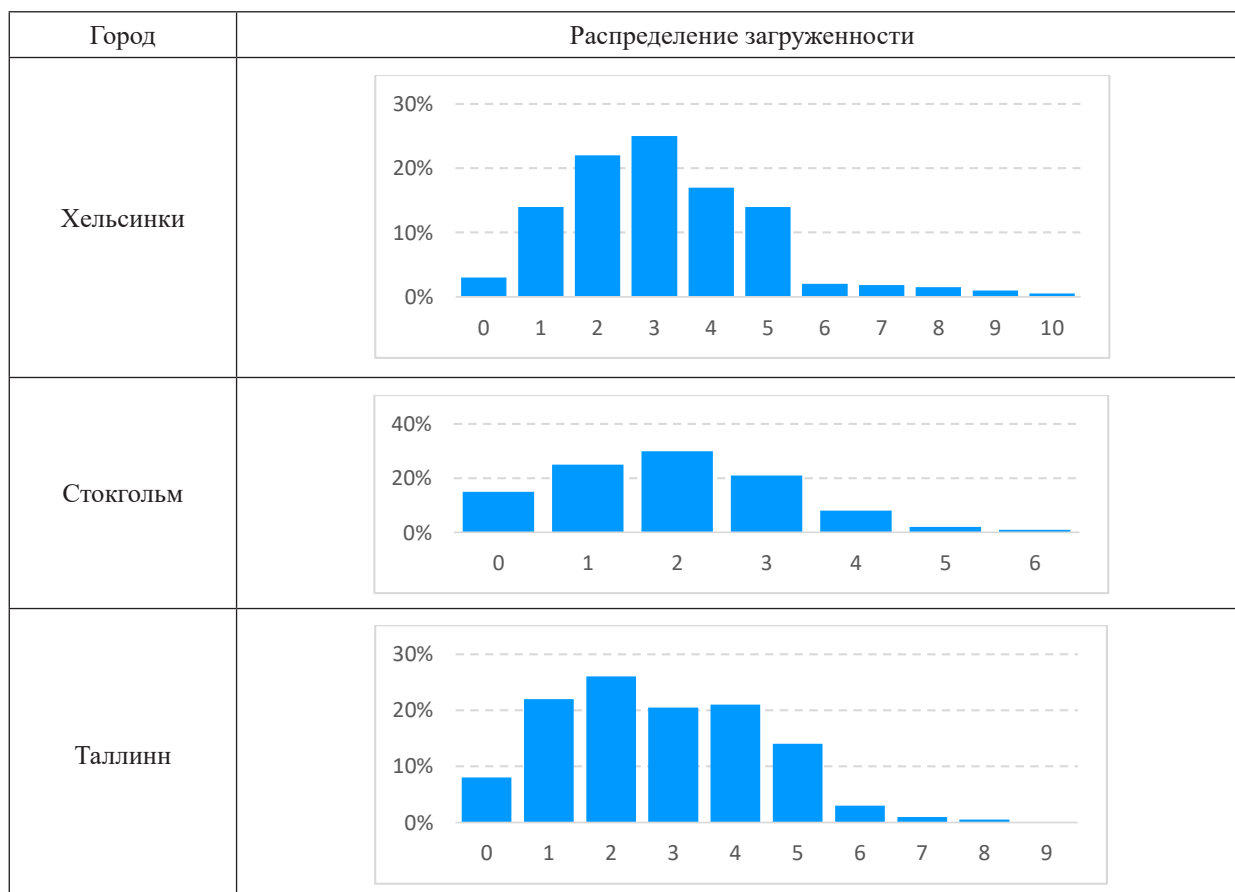
Распределение количества занятых причалов в портах на основе прогона имитационной модели приведено в табл. 7.

Таблица 7

Распределение количества занятых причалов в портах при существующих условиях

Table 7

Distribution of the Number of Occupied Berths at Ports under Existing Conditions



Из полученных результатов видно, что наиболее нагруженными являются причалы города Стокгольм, загрузка которых стремится к 40 %, когда необходимо формирование дополнительной модели и создание нового подхода к формированию расписания для отсутствия пересечений, которые могут привести к образованию кратковременных очередей, когда пришедшему судну не нашлось места в очереди на причал.

Модель доказала свою применимость, а повышение точности выходных данных возможно за счет снижения доли условностей при введении большего количества реальных данных. Полученные итоговые коэффициенты загрузки причалов приведены на рис. 7.

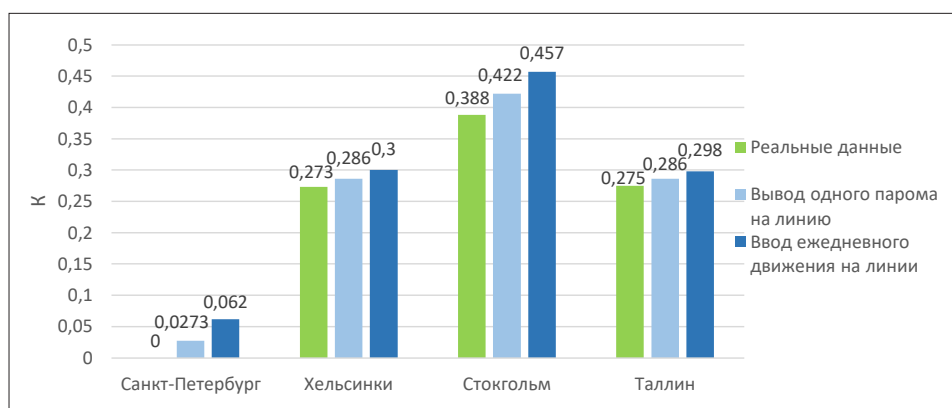


Рис. 7. Коэффициенты загрузки паромных причалов пассажирских портов региона Финского залива при реальном движении и при введении новой теоретической паромной линии

Fig. 7. Ferry Berth Occupancy Ratios at Passenger Ports in the Gulf of Finland Region under Actual Traffic Conditions and after the Introduction of a New Hypothetical Ferry Line

На основе полученных результатов можно сделать вывод о возможностях пассажирских портов по приему разрабатываемого (прогнозируемого к вводу) нового маршрута и судить о загрузке причалов системы морских пассажирских портов в регионе моря.

Обсуждение (Discussion)

Модель выбора маршрута морского парома (см. рис. 1) и разработанная имитационная модель позволяют моделировать различные сценарии маршрутов с различными морскими пассажирскими портами. В данной работе описаны два сценария: прием только по расписанию и прием случайных паромных судов вместе с имеющимся расписанием заходов паромов. Однако возможности разработанного имитационного программного инструментария не ограничиваются только данной задачей. С его помощью можно выполнять следующие действия:

- рассматривать увеличение или уменьшение интенсивности случайного потока паромных судов;
- подключить движение круизных судов и внести специализацию причалов в порту;
- рассматривать изменение инфраструктуры порта: увеличение длины причального фронта или строительство новых причалов для крупных круизных судов;
- рассматривать другие временные промежутки, например, весь период навигации.

Результаты всех модельных экспериментов выводятся на экран в виде наглядных гистограмм и графиков. Трех- и двухмерная визуализации позволяют визуальнo контролировать процесс захода судов для поиска проблемных ситуаций.

В ходе исследования с использованием программного комплекса было выявлено, что изменения или даже некоторое необходимое восстановление паромного маршрута Санкт-Петербург – Хельсинки – Стокгольм – Таллинн возможно и не создаст проблем в портах как при выводе одного парома, следующего раз в три дня, так и трех паромов, следующих ежедневно.

Активное влияние внешней среды, а также региональных, экономических и политических факторов, трендов в сфере паромных перевозок и стремительный рост пассажиропотока формирует необходимость учета новых переменных, трансформирования принятия решений при неопределенности, что требует дальнейшего развития разработанной имитационной модели, отражающей взаимодействие систем «морская паромная линия – морской пассажирский порт», и ее распространения на другие морские пассажирские порты Балтийского моря. Работа имитационной

модели показала, что лицу, принимающему решение по оценке работы морского пассажирского порта, недостаточно только наличия данных за навигацию, необходимо дополнительное использование цифровых двойников для выполнения многосценарного моделирования и формирования набора больших данных.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования выполнено следующее:

1. Разработана новая имитационная модель с модулями интеграции баз данных для оценки пропускной способности морского пассажирского порта, принимающего в модельных сценариях как круизные суда, так и паромные линии.

2. Представлен метод прогнозирования, формирования нового маршрута паромной линии с помощью теории графов с одновременным формированием исходных данных для многокритериального моделирования.

3. Представленные результаты исследования различных сценариев входного потока круизных судов четырех морских пассажирских портов Балтийского региона выявили достаточность данных для последующей работы лиц, принимающих решения по прогнозированию введения новой паромной линии и оценке влияния морских портов друг на друга.

4. На основе анализа результатов многосценарного моделирования установлено, что разработанный модуль может быть успешно использован для моделирования загрузки причалов группы пассажирских портов в регионе моря. Модель может быть масштабирована на большее число портов, формируя дополнительный контур к использованию круговых диаграмм интенсивностей Circos [15].

5. Проведен инфраструктурный анализ и интенсивности движения паромов в портах городов Хельсинки, Стокгольм и Таллинн для формирования базы данных вариантов при многосценарном моделировании и формирования условий для вводных данных для имитационной модели.

6. Сформированные данные (см. табл. 4–7) распределения количества занятых причалов позволяют оценивать различные варианты работы одновременно группы морских пассажирских портов и определять положение выбранного порта в регионе моря для принятия решений о формировании новой паромной линии.

7. Разработанная имитационная модель для морских пассажирских портов позволяет увеличить возможности существующих моделей и методов по оценке загруженности причалов, при снижении времени на моделирование. Несмотря на некоторые теоретические условности во входных данных инфраструктуры пассажирского порта, путем перехода к модели «условного порта» точность получаемых данных получилась на высоком уровне. Эффективность моделирования морского пассажирского порта для лица, принимающего решение, и руководителя морского пассажирского порта позволяет добиться высокой скорости получения данных многосценарного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krile S. Application of the minimum cost flow problem in container shipping. / S. Krile // *Electronics in Marine*, 2004. Proceedings Elmar 2004. 46th International Symposium. — 2004. — Pp. 466–471. — DOI: 10.1109/ELMAR.2004.1356421.
2. Майоров Н. Н. Методологический базис организации сети морских пассажирских перевозок / Н. Н. Майоров // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2018. — № 2. — С. 28–37. — EDN XFPUDS. — DOI: 10.24143/2073-1574-2018-2-28-37.
3. Ćorluka G. Cruise Port Passenger Flow Analysis: a Cruise Port Governance Perspective / G. Ćorluka, I. Peronja, D. Tubić // *Naše more*. — 2020. — Vol. 67. — Is. 3. — Pp. 181–191. — DOI: 10.17818/nm/2020/3.1.
4. Язвенко М. Р. Универсальная имитационная модель потока поступления круизных и паромных судов в морской пассажирский порт / М. Р. Язвенко // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 350–364. — EDN FKUCBB. — DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-350-364.

5. Krile S. The influence of external environment to the ferry lines and marine passenger terminals / S. Krile, N. Maiorov // *Transport Problems*. — 2020. — Vol. 15 — Is. 4 — Part 2. — Pp. 203–214. — EDN PTKXFL. — DOI: 10.21307/TP-2020-060.
6. Dorigatti J. Cruise Industry Trends and Cruise Ships' Navigational Practices in the Central and South Part of the Adriatic East Coast Affecting Navigational Safety and Sustainable Development / J. Dorigatti, T. Perić, G. J. Mrčelić // *Applied Sciences*. — 2022. — Vol. 12. — Is. 14. — DOI: 10.3390/app12146884.
7. London W. R. Power in the context of cruise destination stakeholders' interrelationships / W. R. London, G. Lohmann // *Research in Transportation Business & Management*. — 2014. — Vol. 13. — Pp. 24–35. — DOI: 10.1016/j.rtbm.2014.11.004.
8. Dorigatti J. Cruise Industry Trends and Cruise Ships' Navigational Practices in the Central and South Part of the Adriatic East Coast Affecting Navigational Safety and Sustainable Development / J. Dorigatti, T. Perić, G. J. Mrčelić // *Applied Sciences*. — 2022. — Vol. 12. — Is. 14. — DOI: 10.3390/app12146884.
9. Язвенко М. Р. Исследование загруженности причалов морского пассажирского порта на основе моделирования / М. Р. Язвенко // *Системный анализ и логистика*. — 2021. — № 2(28). — С. 104–113. — EDN EJHUUQ. — DOI: 10.31799/2077-5687-2021-2-104-113.
10. Майоров Н. Н. Исследование и разработка информационно-измерительной системы для многоприоритетных потоков / Н. Н. Майоров, М. Р. Язвенко // *Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей VII Международного форума, Санкт-Петербург, 04 марта 2025 года*. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2025. — С. 204–205. — EDN KZZHLW.
11. Maiorov N. N. Research and Development of an Algorithm for Multi-Priority Flows in Transportation Systems / N. N. Maiorov, M. R. Yazvenko // *2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF) – 2024*. — С. 1–4. — DOI: 10.1109/WECONF61770.2024.10564652.
12. Майоров Н. Н. Исследование загруженности причалов морского пассажирского порта на основе имитационной модели с учетом региональных особенностей и стохастического влияния внешней среды / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, М. Р. Язвенко // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2025. — Т. 17, № 6. — С. 801–815. — EDN CFLCLU. — DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-6-801-815.
13. Майоров Н. Н. Развитие морских паромных перевозок в балтийском море в контексте глобальных тенденций // *Системный анализ и логистика: журнал: выпуск № 1 (23), ISSN 2007-5687*. — СПб.: ГУАП., 2020 — С. 65–73. — EDN WGCRTK.
14. Eurostat. Maritime passenger statistics 2025 | Statistics Explained. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Maritime_passenger_statistics (дата обращения: 01.12.2025).
15. Оптимизационный эксперимент в AnyLogic [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://anylogic.help/ru/anylogic/experiments/optimization-experiment.html> (дата обращения: 01.05.2026).
16. Maiorov N. N. Research of the transport terminal position based on the analysis of the digital circons model / N. N. Maiorov // *2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2021 – Conference Proceedings, Saint-Petersburg, 31 May – 04 2021*. Vol. [4]. — Saint-Petersburg, 2021. — P. 9470582. — EDN SUSNBL. — DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470582.

REFERENCES

1. Krile, S. "Application of the minimum cost flow problem in container shipping." *Proceedings. Elmar-2004. 46th International Symposium on Electronics in Marine*. IEEE, 2004: 466–471. DOI: 10.1109/ELMAR.2004.1356421.
2. Mayorov, N. N. "Methodological principles of the organization of the marine passenger transport network." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2018): 28–37. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-2-28-37.
3. Ćorluka, G., I. Peronja and D. Tubić. "Cruise Port Passenger Flow Analysis: a Cruise Port Governance Perspective." *Nase More* 67.3 (2020): 181–191. DOI: 10.17818/nm/2020/3.1.
4. Yazvenko, M. R. "Universal simulation model of cruise and ferry ships flow to a sea passenger port." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 17.3 (2025): 350–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-350-364.

5. Krile, S. and N. Maiorov. "Krile, S. The influence of external environment to the ferry lines and marine passenger terminals ." *Transport Problems* 15.1 (2020): 203–214. DOI: 10.21307/TP-2020-060.
6. Dorigatti, J., T. Perić and G. J. Mrčelić. "Cruise Industry Trends and Cruise Ships' Navigational Practices in the Central and South Part of the Adriatic East Coast Affecting Navigational Safety and Sustainable Development." *Applied Sciences* 12.14 (2022). DOI: 10.3390/app12146884.
7. London, W. R. and G. Lohmann. "Power in the context of cruise destination stakeholders' interrelationships." *Research in Transportation Business & Management* 13 (2014): 24–35. DOI: 10.1016/j.rtbm.2014.11.004.
8. Dorigatti, J., T. Perić and G. J. Mrčelić. "Cruise Industry Trends and Cruise Ships' Navigational Practices in the Central and South Part of the Adriatic East Coast Affecting Navigational Safety and Sustainable Development." *Applied Sciences* 12.14 (2022). DOI: 10.3390/app12146884.
9. Yazvenko, M. R. "Research of berths utilization at sea passenger port on the basis of modeling." *System Analysis and Logistics* 2(28) (2021): 104–113. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-2-104-113.
10. Mayorov, N. N. and M. R. Yazvenko . "Research and development of an information modification system for multi-priority streams." *Metrologicheskoe obespechenie innovatsionnykh tekhnologiy : Sbornik statey VII Mezhdunarodnogo foruma, Sankt-Peterburg, 04 marta 2025 goda* Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2025: 204–205.
11. Maiorov, N. N. and M. R. Yazvenko. "Research and Development of an Algorithm for Multi-Priority Flows in Transportation Systems." *2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)* – . 2024: 1–4. DOI: 10.1109/WECONF61770.2024.10564652.
12. Mayorov, N. N., V. A. Fetisov and M. R. Yazvenko. "Research of berth occupancy at a sea passenger port based on a simulation model accounting for regional features and stochastic external influences." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 17.6 (2025): 801–815. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-6-801-815.
13. Mayorov, N. N. "Development of marine ferry transportation in the baltic sea in the context of global trends." *System Analysis and Logistics* 1(23) (2020): 65–73.
14. Eurostat. Maritime passenger statistics 2025 | Statistics Explained. Web. 1 december 2025 < <https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained>>
15. Optimizatsionnyy eksperiment v AnyLogic. Web. 1 May 2026 <<https://anylogic.help/ru/anylogic/experiments/optimization-experiment.html>>.
16. Maiorov, N. N. "Research of the Transport Terminal Position Based on the Analysis of the Digital Circos Model." *2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. 2021: 1–4. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470582.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Майоров Николай Николаевич —
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская 67, лит. А
e-mail: nmsoft@yandex.ru
Язвенко Максим Романович —
аспирант
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»
190000, Россия, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
e-mail: YazvenkoM@guap.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maierov, Nikolai N. —
Doctor of Technical Sciences, Professor
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A, Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg,
190000, Russian Federation
e-mail: nmsoft@yandex.ru
Yazvenko, Maksim R. —
Postgraduate Student
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A, Bolshaya Morskaya str.,
Saint-Petersburg,
190000, Russian Federation
e-mail: YazvenkoM@guap.ru

Статья поступила в редакцию: 17 мая 2026 г.
Received: May 17, 2026.

МЕТОДЫ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ФРАХТОВОГО РЫНКА

А. Н. Ситов¹, А. Л. Кузнецов¹, Я. А. Сперанская²

¹ ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ФАУ «Российский морской регистр судоходства»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе выполнено исследование модели рынка судоходства как высокودинамической системы, подверженной воздействию множества внешних факторов, к которым относятся как длительные факторы, такие как общие тенденции развития мировой экономики и глобальной торговли, технологические изменения в сфере морских перевозок, глубинные циклы трансформации конъюнктуры и структуры рынка в рамках международных производственно-сбытовых цепочек с участием морского транспорта, так и кратковременные проявления кризисных финансово-экономических явлений, геополитических конфликтов, а также иных ситуативных возмущений, оказывающих временное воздействие на динамику рынка. Отмечается, что совокупное действие указанных механизмов порождает сложное и слабопредсказуемое поведение системы, которое в теории динамических систем трактуется как изменение ее свойств и состояний во времени. Подчеркивается, что во многих случаях сложное поведение больших динамических систем формируется под совокупным влиянием множества относительно простых факторов, поддающихся идентификации, количественной оценке и анализу. Сделан вывод о том, что декомпозиция такой динамической системы, как рынок судоходства, на элементарные составляющие с последующим исследованием взаимодействий между ее отдельными компонентами позволяет сформировать надежную методологическую основу для комплексного анализа и прогнозирования ее поведения, что особенно актуально в сложившейся геополитической ситуации на глобальном рынке морских перевозок и в наибольшей степени в России. В работе предпринята попытка создания инновационного инструмента, предназначенного для объяснения глубинных внутренних механизмов и повышения достоверности методов прогнозирования в этой области.

Ключевые слова: рынок судоходства, фрахтовый рынок, динамическая система, транспортное судно, факторы, конечный автомат, процессы гибели-размножения, аттрактор, странный аттрактор, моделирование, прогнозирование.

Для цитирования:

Ситов, А. Н. Методы динамического моделирования в исследовании фрахтового рынка / А. Н. Ситов, А. Л. Кузнецов, Я. А. Сперанская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 4. С. 593–602. EDN RRJJKW. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-593-602.

DYNAMIC MODELING METHODS IN FREIGHT MARKET RESEARCH

A. N. Sitov¹, A. L. Kuznetsov¹, Y. A. Speranskaya²

¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² Russian Maritime Register of Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The study examines the shipping market model as a highly dynamic system affected by numerous external factors. These include long-term factors such as general trends in the development of the global economy and global trade, technological changes in maritime transportation, and deep-seated cycles of transformation in market conditions and structure within international supply chains involving maritime transport, as well as short-term manifestations of financial and economic crises, geopolitical conflicts, and other situational disturbances that temporarily affect

market dynamics. The combined effect of these mechanisms produces complex and poorly predictable system behavior, which in dynamical systems theory is interpreted as changes in its properties and states over time. It is emphasized that, in many cases, the complex behavior of large dynamical systems results from the combined influence of numerous relatively simple factors that can be identified, quantified, and analyzed. It is concluded that decomposing a dynamical system such as the shipping market into elementary components, followed by an analysis of the interactions between its individual components, provides a reliable methodological basis for comprehensive analysis and forecasting of its behavior. This is particularly relevant in the current geopolitical situation in the global maritime transportation market and, to the greatest extent, in Russia. The study attempts to develop an innovative tool intended to explain underlying internal mechanisms and improve the reliability of forecasting methods in this field of knowledge.

Keywords: shipping market, freight market, dynamical system, transport vessel, factors, finite-state machine, birth–death processes, attractor, strange attractor, modeling, forecasting.

For citation:

Sitov, Alexander N., A. L. Kuznetsov and Y. A. Speranskaya. "Dynamic modeling methods in freight market research" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 18.4 (2026): 593–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-593-602.

Введение (Introduction)

Для любого вида рынка, вне зависимости от его специфических свойств и обращающейся на нем товарной группы, характерно наличие непрерывного динамического процесса выравнивания спроса и предложения, являющегося ключевым механизмом саморегулирования рынка, обеспечивающим его устойчивость как динамической системы. Временные отклонения от положения равновесия порождают внутренние стимулы, которые способствуют возвращению рынка к сбалансированному состоянию. На практике процесс выравнивания спроса и предложения обеспечивает не статическое «идеальное» равновесие, а лишь приводит к динамическому равновесию — состоянию непрерывной адаптации рыночной системы к изменяющимся внешним и внутренним условиям.

Рынок морских перевозок подчиняется общим рыночным закономерностям. В качестве товара в данном случае выступают транспортные услуги, объем и качество которых определяются провозной способностью действующего флота [1–3]. Основными факторами, оказывающими влияние на предложение услуг морского транспорта, являются: текущий размер и структура эксплуатируемого флота, географическое распределение тоннажа, уровень операционных издержек, а также определенные регуляторные ограничения, действующие на отдельных маршрутах или в регионах. Спрос на тоннаж, в свою очередь, формируется под воздействием динамики мировой торговли и промышленного производства, глобальной геополитической и экономической обстановки, а также сезонных особенностей отдельных грузопотоков.

С математической точки зрения такой свободный рынок представляет собой комплексную динамическую систему, состояние которой определяется совокупностью взаимосвязанных элементов, описываемых непрерывно изменяющимися во времени параметрами [4]. В рамках настоящего исследования элементами рассматриваемой системы являются транспортные суда на различных этапах их жизненного цикла: находящиеся в настоящий момент в эксплуатации, заказанные для постройки, вводимые в строй и подлежащие списанию [5]. Указанные элементы описываются параметрами двух типов: *управляемыми* (поддающимися целенаправленному регулированию и изменению) и *случайными* (не поддающимися контролю и точному прогнозу). Именно влияние случайных параметров обуславливает стохастический (вероятностный) характер поведения всей динамической системы в целом.

Рассматриваемая динамическая система подвержена одновременному воздействию как внутренних, так и внешних сил. Внутренние силы порождаются взаимодействием элементов самой системы, внешние — возникают под влиянием различных внешних факторов и сторонних объектов. Предметом исследования в данной статье является внутренняя структура динамической системы, т. е. совокупность ее элементов и установленных между ними взаимосвязей, в то время

как внешние объекты и условия их влияния на рассматриваемую систему принимаются как заданные экзогенные возмущения, не подлежащие углубленному изучению в рамках настоящей работы [6].

Основной целью исследования является анализ качественной динамики системного поведения, а именно выявление закономерностей эволюции системы во времени в зависимости от изменения внутренних параметров и воздействия внешних факторов. При этом получение конкретного варианта поведения системы не ставится в качестве задачи, так как оно неизбежно оказывается некоторой реализацией случайного процесса. Такой подход позволяет сформировать концептуальную основу для разработки эффективного и надежного инструмента прогнозирования, применимого в среднесрочной и долгосрочной перспективе.

Методы и материалы (Methods and materials)

Для анализа ключевых действующих факторов и выявления существенных свойств системы предлагается выполнить упрощение модели рынка судоходства до минимального числа базовых элементов, которые были обозначены ранее, что позволит сосредоточиться на ключевых закономерностях функционирования системы, исключив второстепенные детали, которые усложняют анализ без существенного увеличения точности [7].

Каждый элемент системы формализуется посредством соответствующей динамической переменной, характеризующей ее состояние в конкретный момент времени $[t]$:

- спрос на суда (*demand*) $D[t]$;
- суда в эксплуатации (*work*) $W[t]$;
- суда в постройке (*build*) $B[t]$;
- заказ на постройку судов (*order*) $O[t]$;
- ввод судов в эксплуатацию (*launch*) $L[t]$;
- вывод судов из эксплуатации (*scrap*) $S[t]$.

Очевидно, что исследуемая динамическая система эволюционирует во времени, неизбежно изменяя свое состояние под влиянием комплекса внутренних и внешних факторов. Так, при известном состоянии элементов системы в момент времени $[t]$ ее последующее состояние в момент $[t + 1]$ определяется совокупностью правил перехода, формализующих закономерности трансформации системы:

1. $D[t]$ — независимая (управляющая) переменная, свободная переменная в модели, характеризующая влияние внешних факторов, рассмотренных в данной работе ранее. При разработке внутренней нотации задачи данные факторы не подлежат дальнейшему разложению или анализу, они фиксируются как экзогенные входные параметры, определяющие внешние условия работы системы.

2. $W[t + 1] = W[t] - S[t] + L[t]$. — численность эксплуатируемого флота не является постоянной величиной — значение рассматриваемого параметра сокращается за счет вывода отдельных судов из эксплуатации, ввиду физического износа, морального устаревания, экономической нецелесообразности их дальнейшего использования, а также других факторов, и увеличивается вследствие ввода в строй новых судов.

3. $B[t + 1] = B[t] + O[t] - L[t]$. — количество судов в постройке динамически изменяется под влиянием двух противоположных процессов: возрастает за счет размещения новых заказов на судостроительных верфях и сокращается вследствие ввода завершаемых строительством судов в эксплуатацию.

4. $O[t + 1] = \text{if } pos \{R[t] \cdot (D[t] - W[t] - B[t])\} \text{ else } 0$, где $R[t]$ — скорость принятия рыночного решения.

Данное соотношение формализует количество новых заказов на строительство судов как положительную разницу между текущим спросом на них и совокупным размером действующего флота, включая как эксплуатируемые, так и уже заказанные суда. Величина этой разницы служит количественным индикатором потребности в расширении флота: чем значительнее разрыв между спросом и имеющимися мощностями, тем выше экономическая обоснованность размещения новых заказов на судостроительных верфях.

5. $L[t + 1] = O[t - T_{build}]$, где T_{build} — средний срок строительства судна на верфи.

Данное соотношение формализует факт ввода судов в эксплуатацию как запаздывающую реакцию на ранее размещенные заказы, другими словами, оно определяет, что суда, вводимые в строй в момент времени $[t]$, были заказаны в момент $[t - T_{build}]$. Данное правило перехода системы от состояния к состоянию позволяет прогнозировать пополнение флота на основе данных о текущих и прошлых заказах, предполагая, что все заказы выполняются в срок и без отмены, а время постройки судна является фиксированной величиной.

6. $S[t + 1] = L[t - T_{life}]$, где T_{life} — нормативный срок эксплуатации судна.

Аналогичным образом процесс вывода судов из эксплуатации формализуется через фиксированный временной параметр T_{life} . Суда, введенные в строй в момент времени $[t - T_{life}]$, достигают конца своего эксплуатационного цикла в момент $[t]$ и подлежат списанию.

Таким образом, динамика рассматриваемой системы представляет собой совокупность состояний, связанных между собой причинно-следственными связями, где каждое новое состояние формируется под влиянием предыдущего состояния, внутренних взаимосвязей между элементами системы, внешних воздействий и вероятностных факторов [8].

Обсуждение (Discussion)

Рассмотренные ранее соотношения задают формальную математическую структуру, которую можно интерпретировать как детерминированный конечный автомат. Детерминированный конечный автомат (ДКА) является одной из простейших математических моделей вычислений в теории алгоритмов, характеризующейся ограниченной памятью и дискретным поведением.

Ключевым свойством ДКА является однозначность переходов между двумя последовательными состояниями: функция переходов исключает наличие альтернативных путей и не допускает возможных ветвлений, в ответ на заданный входной параметр модель принимает определенное начальное состояние и далее изменяет его в соответствии с установленным правилом, заданным функцией переходов, при этом автомат может находиться только в одном из ограниченного числа состояний в каждый конкретный (дискретный) момент времени.

Важной особенностью модели является наличие внутренней памяти: каждое новое состояние системы в момент времени $[t + 1]$ зависит не только от текущих входных параметров, но и от ее состояния в момент времени $[t]$. Благодаря детерминизму и однозначности правил перехода модель гарантирует воспроизводимость своего поведения, т. е. при одинаковых входных данных детерминированный конечный автомат всегда будет проходить одну и ту же последовательность состояний вне зависимости от возможных внешних случайных факторов или предыдущих запусков.

Математический аппарат, примененный ранее для описания состояний модели рынка судоходства и последовательного перехода между ними [9], основывается на концепции марковских случайных процессов типа «гибели – размножения», в которых изменение текущего состояния возможно исключительно путем перехода в одно из двух соседних состояний. Такое ограничение существенно упрощает анализ динамики системы при сохранении достаточной реалистичности описания.

Несмотря на кажущуюся сложность рассмотренных теоретических понятий, простейшую модель можно эффективно реализовать с использованием средств VBA MS Excel, что позволяет провести численное моделирование и визуализацию результатов без привлечения специализированного программного обеспечения.

Результаты (Results)

Исследование модели рынка судоходства может быть проведено в двух принципиально различных режимах, каждый из которых позволяет изучить специфические аспекты динамики системы и проверить устойчивость модели к различным воздействиям. При этом в обоих случаях динамика поведения модели определяется внутренними механизмами, зависящими от соотношений показателей T_{life} , T_{build} и $R[t]$.

В первом режиме предполагается наличие постоянного уровня спроса на суда, который задается константой $D[t] = \text{const} = D_0$. Данный подход соответствует некоторому идеализированному представлению о стабильном рынке, неизменно находящемся в состоянии равновесия и не реагирующем на внешние возмущения. В то же время такая абстракция позволяет изучить базовую динамику поведения системы в равновесном режиме, определить равновесный размер флота, а также выявить стационарное распределение состояний модели, характеризующее ее долгосрочное поведение и устойчивое функционирование.

При постоянном спросе на тоннаж динамика модели демонстрирует наличие классических синергетических аттракторов — устойчивых состояний системы, к которым «притягиваются» все возможные траектории ее развития независимо от начальных условий. Такие аттракторы представляют собой стационарные уровни, характеризующие долгосрочное равновесное поведение системы. С математической точки зрения это выражается в сходимости решений к некоторым фиксированным точкам при $t \rightarrow \infty$, что свидетельствует об устойчивости равновесного состояния рынка судоходства в условиях стабильного спроса (рис. 1 и 2).

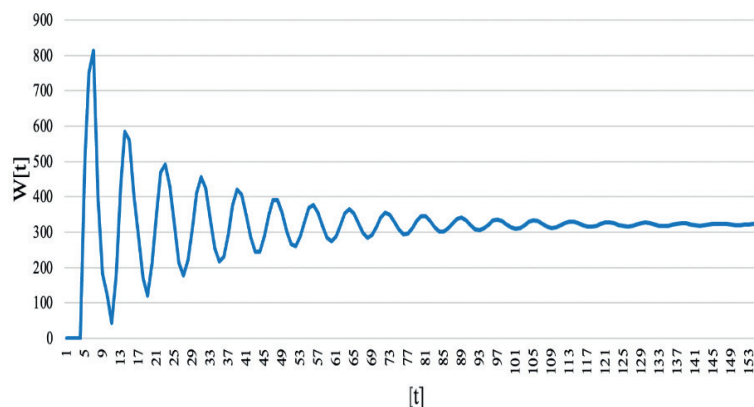


Рис. 1. Зависимость количества судов в эксплуатации от времени при постоянном спросе на суда

Fig. 1. Number of Vessels in Operation over Time under Constant Vessel Demand

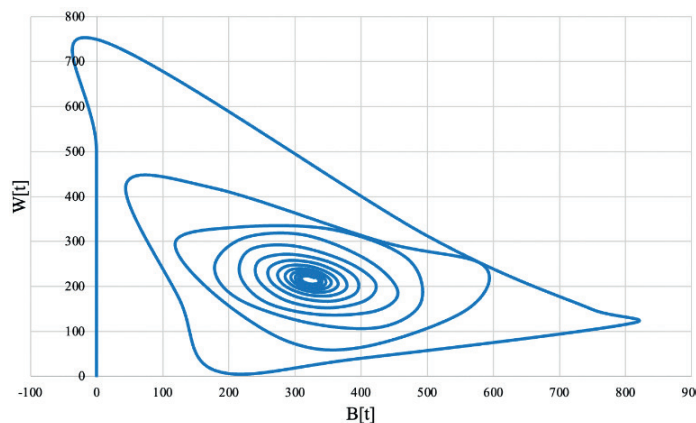


Рис. 2. Классический аттрактор эксплуатируемого тоннажа при постоянном спросе на суда

Fig. 2. Classical Attractor of Operating Fleet Tonnage under Constant Vessel Demand

Второй режим учитывает воздействие внешних факторов на динамическую систему и моделирует спрос на тоннаж как случайный процесс, непрерывно и непредсказуемо изменяющийся во времени, что приближает рассматриваемую модель к реальным условиям функционирования рынка судоходства [10]. Так, при произвольном изменении спроса на тоннаж в динамике модели

выявляются «странные аттракторы», которые, в отличие от классических синергетических аттракторов, отражают не фиксированное равновесное состояние фрахтового рынка, а относительно стабильные колебательные процессы, указывают на скрытую упорядоченность в кажущихся случайными колебаниях и имеют значительно более сложную геометрическую структуру в фазовом пространстве (рис. 3 и 4). Структура странного аттрактора наглядно демонстрирует, что система не стабилизируется в одной точке, а колеблется вокруг некоторого среднего состояния, формируя устойчивые циклы и не выходя за определенные границы.

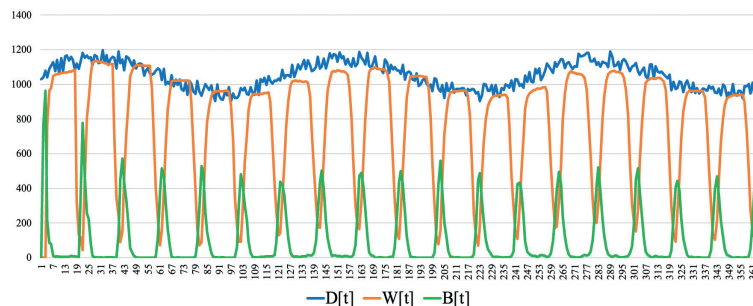


Рис. 3. Зависимости количества судов в эксплуатации и в постройке от времени при переменном спросе на суда

Fig. 3. Number of Vessels in Operation and under Construction over Time under Variable Vessel Demand

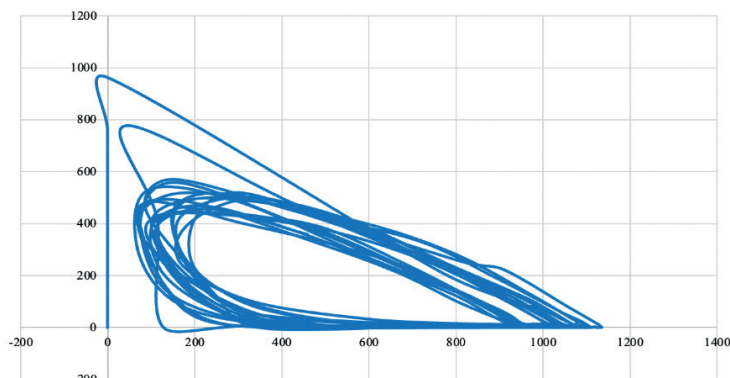


Рис. 4. Странный аттрактор действующего тоннажа при переменном спросе на суда

Fig. 4. Strange Attractor of Operating Fleet Tonnage under Variable Vessel Demand

Эксперименты с моделью показывают, что произвольно меняющийся спрос на суда $D[t]$ приводит к случайным колебаниям величины тоннажа на фрахтовом рынке (рис. 5).

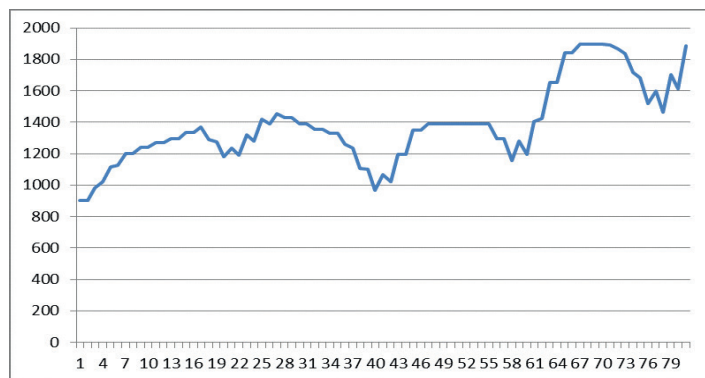


Рис. 5. Колебания тоннажа при переменном спросе на него

Fig. 5. Tonnage Fluctuations under Variable Demand

Характер наблюдаемых колебаний имеет сходные черты с реальными статистическими данными о динамике рынка судоходства. Предложенная авторами модель демонстрирует высокую точность воспроизведения формы кривой, периодичности и амплитуды колебаний, согласующихся с реальными статистическими данными и фактическими рыночными циклами (рис. 6). Такое соответствие свидетельствует о высокой степени адекватности разработанной модели реальным процессам и, как следствие, обосновывает возможность ее использования в качестве надежного инструмента для прогнозирования динамики рынка судоходства и количественной оценки рисков с высокой степенью точности [11].

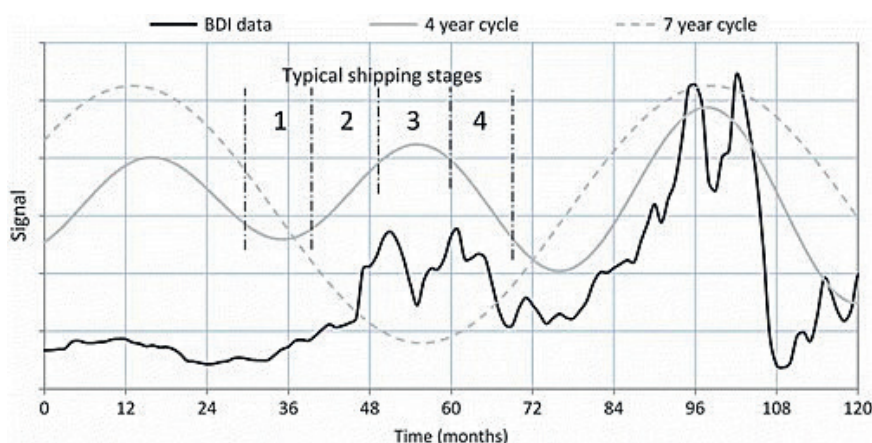


Рис. 6. Пример реальной статистики колебаний тоннажа [12]
Fig. 6. Example of Actual Statistical Data on Tonnage Fluctuations

Следует отметить, что точное прогнозирование любого реального случайного процесса подобной природы на практике недостижимо из-за его стохастического характера и воздействия множества неконтролируемых внешних и внутренних факторов. В таких случаях, в соответствии с положениями теории математической статистики, сходство между модельными и реальными процессами оценивается не детерминированно, а на основе вероятностных характеристик. Так, разработанная модель призвана воспроизводить не отдельные реализации процесса, а его устойчивые вероятностные закономерности (типичные сценарии, диапазоны и периодичность изменений) через статистические характеристики, доверительные интервалы и критерии значимости различий.

Заключение (Conclusion)

Сопоставление динамики модельных показателей с реальными статистическими данными выявило существенное сходство в характере колебаний, что позволяет утверждать следующее: предложенная авторами упрощенная модель с высокой степенью вероятности адекватно воспроизводит реальную ситуацию на рынке тоннажа [13]. Это дает основание использовать модель для проведения серии начальных экспериментальных исследований, направленных на выявление ключевых факторов, влияющих на рассматриваемую динамическую систему, оценку относительной значимости этих факторов посредством количественного анализа чувствительности модели, определение господствующих механизмов взаимодействия между различными элементами системы и, как следствие, установление закономерностей ее функционирования, а также разработку базовых сценариев развития моделируемого рынка судоходства при различных комбинациях внешних и внутренних воздействий.

Анализ механизмов поведения модели может послужить в качестве фундаментальной основы для долгосрочного прогнозирования динамики рынка тоннажа. Несмотря на кажущуюся непредсказуемость и абсолютную случайность колебаний, они демонстрируют свойства синергетической устойчивости, т. е. подчиняются внутренним закономерностям самоорганизации системы и непременно возвращаются к равновесному режиму после любых возмущений. При этом

важно учитывать принципиальное ограничение возможного прогнозирования — любые реальные прогнозы могут охватывать лишь общие тенденции развития рынка, а не отдельные реализации процесса. Таким образом, предложенная в статье модель не претендует на точное предсказание краткосрочных колебаний, но обеспечивает понимание глубинных механизмов рынка судоходства на основе выявленных синергетических закономерностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Л. Синергетика как методологическая основа развития базовой инфраструктуры портоориентированной логистики / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, А. В. Кириченко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 19–34. — EDN XHLRGP. — DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-19-34.
2. Слицан А. Е. Структура системы «рынок продукции морского транспорта» / А. Е. Слицан, С. А. Слицан // Эксплуатация морского транспорта. — 2006. — № 2(46). — С. 3–6. — EDN HVPJFH.
3. Кузнецов А. Л. Прогнозирование развития морских портов на основе синергетических законов развития сложных взаимодействующих систем: монография / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, А. В. Кириченко. — Санкт-Петербург: Изд-во ГУМФ имени адмирала С. О. Макарова, 2017. — 176 с.
4. Прозоров К. В. Исследование влияния отдельных факторов на уровень фрахтовой ставки / К. В. Прозоров, Я. А. Сперанская, А. Е. Слицан // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 682–690. — EDN HFJBDN. — DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-682-690.
5. Мамедова Л. Э. Г. Мировой и внутренний грузооборот как основной фактор развития судостроительной промышленности / Л. Э. Г. Мамедова, М. Е. Гоголюхина // Транспортное дело России. — 2023. — № 2. — С. 117–121. — EDN EPHGUB. — DOI: 10.52375/20728689_2023_2_117.
6. Скотченко А. С. Плоские и многомерные экономические модели прогнозирования / А. С. Скотченко // Экономика: вчера, сегодня, завтра. — 2023. — Т. 13, № 5–1. — С. 35–44. — EDN XRMGAI. — DOI: 10.34670/AR.2023.52.74.069.
7. Бабурина О. Н. Мировой морской торговый флот: динамика, структура, перспективы / О. Н. Бабурина, Е. В. Хекерт, Ю. Л. Никулина // Транспортное дело России. — 2017. — № 1. — С. 88–92. — EDN YICKXR.
8. Анализ фрахтовых ставок на перевозку навалочных грузов в портах Российской Федерации в период с апреля 2024 по апрель 2025 года / Е. В. Бабчук, А. О. Березин, А. С. Реуцкий, Я. А. Сперанская // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 21–31. — EDN AOHYSK.
9. Шиянская К. Ф. Стратегия и динамика фрахтового рынка в транспортно-логистической системе / К. Ф. Шиянская, А. В. Волянская // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, 16–25 октября 2020 года. — Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2020. — С. 387–390. — EDN WZSWNJ.
10. Ситов А. Н. Методика определения фрахтовых индексов / А. Н. Ситов, Я. А. Сперанская, А. Е. Слицан // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 935–945. — EDN DRRABY. — DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-935-945.
11. Кузнецов А. Л. Портоориентированная логистика России в новых геополитических условиях / А. Л. Кузнецов, А. Е. Слицан, А. Н. Ситов // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»: сборник статей конференции, Санкт-Петербург, 30 сентября – 20 октября 2024 года. — Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2025. — С. 121–125. — EDN MVEIKQ.
12. Martin Stopford Maritime economics. Second edition / USA – Routledge. — 2009. — P. 815.
13. Тимченко Т. Н. Методические основы исследований рынка услуг морского транспорта / Т. Н. Тимченко // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 1 (63). — С. 14–18. — EDN NYDLNP.

REFERENCES

1. Kuznetsov, A. L., A. V. Galin and A. V. Kirichenko. "The synergy as the methodological approach for the basical infrastructure of port-oriented logistics." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6 (40) (2016): 19–34. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-19-34.
2. Slitsan, A. E. and S. A. Slitsan. "Struktura sistemy "Rynok produktsii morskogo transporta". *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2 (46) (2006): 3–6.
3. Kuznetsov, A. L., A. V. Galin and A. V. Kirichenko. *Prognozirovanie razvitiya morskikh portov na osnove sinergetiche-skikh zakonov razvitiya slozhnykh vzaimodeystviyushchikh sistem: monografiya*. Sankt-Peterburg: Izd-vo GUMF imeni admirala S. O. Makarova, 2017: 176.
4. Prozorov, K. V., Ya. A. Speranskaya and A. E. Slitsan. "Investigation of the influence of individual factors on the level of freight rates." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 682–690. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-682-690.
5. Mamedova, L. E. g. and M. E. Gogolyukhina. "World and internal cargo turnover as the main factor of shipbuilding development." *Transport Business in Russia* 2 (2023): 117–121. DOI: 10.52375/20728689_2023_2_117.
6. Skotchenko, A. S. "Flat and m multivariate economic forecasting models." *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow* 13.5-1 (2023): 35–44. DOI: 10.34670/AR.2023.52.74.069.
7. Baburina, O. N., E. V. Khekert and Yu. L. Nikulina. "World maritime merchant fleet: dynamics, structure, prospects." *Transport Business in Russia* 1 (2017): 88–92.
8. Babchuk, E. V., A. O. Berezin, A. S. Reutskiy and Ya. A. Speranskaya. "Analysis of bulk cargo freight rates in the ports of the russian federation in the period from april 2024 to april 2025." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 80 (2025): 21–31.
9. Shiyanskaya, K. F. and A. V. Volyanskaya. "Strategiya i dinamika frakhtovogo rynka v transportno-logisticheskoy sisteme." *Sbornik nauchnykh statey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO "GUMRF imeni admirala S. O. Makarova", Sankt-Peterburg, 16 sentyabrya – 25 oktyabrya 2020 goda* Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vyshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2020: 387–390.
10. Sitov, A. N., Ya. A. Speranskaya and A. E. Slitsan. "Methodology for determining freight indices." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 935–945. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-935-945.
11. Kuznetsov, A. L., A. E. Slitsan and A. N. Sitov. "Russian port-oriented logistics in the new geopolitical conditions." *Sbornik nauchnykh statey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO "GUMRF imeni admirala S. O. Makarova" : Sbornik statey konferentsii, Sankt-Peterburg, 30 sentyabrya – 20 2024 goda* Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2025: 121–125.
12. Stopford, M. *Maritime economics. Second edition*. USA : Routledge , 2009: 815.
13. Timchenko, T. N. "Methodological basics of the studies of maritime transport service market." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1 (63) (2011): 14–18.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ситов Александр Николаевич —
кандидат экономических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_top@gumrf.ru
Кузнецов Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sitov, Alexander N. —
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7, Dvinskaya str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: kaf_top@gumrf.ru
Kuznetsov, Alexander L. —
Doctor of Technical Sciences, Professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7, Dvinskaya str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

Сперанская Яна Андреевна —
аналитик
ФАУ «Российский морской
регистр судоходства»,
191186, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Дворцовая набережная, д. 8
e-mail: speranskaia.ia@rs-class.org

Speranskaya, Yana A. —
analyst
FAI «Russian Maritime
Register of Shipping»
8, Palace Emb., St. Petersburg,
191186, Russian Federation
e-mail: speranskaia.ia@rs-class.org

Статья поступила в редакцию: 15 мая 2026 г.

Received: May 15, 2026.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТА СУДНА: ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ, ОГРАНИЧЕНИЯ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

Д. А. Акмайкин

Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского,
Владивосток, Российская федерация

Актуальность исследования обусловлена переходом морской отрасли от ручной прокладки маршрутов к полуавтоматическим и интегрированным навигационным системам в рамках концепции автономного судовождения. Требования резолюций ИМО А.893(21), СОЛАС-74 и ПДНВ-78 делают обязательным тщательное планирование рейса, однако существующие системы различаются по функционалу и имеют ограничения, что затрудняет выбор оптимального решения. В работе выполнен сравнительный анализ ведущих систем планирования маршрута с выявлением их возможностей, слабых сторон и тенденций развития. Методика включает анализ нормативно-правовой базы, изучение технической документации и научных публикаций, сравнительную оценку по критериям: предварительная прокладка, контроль глубины под килем, погодная оптимизация, учет углеродной интенсивности, поддержка цифровых двойников. Установлено, что системы Wärtsilä и OneOcean являются предпочтительными для прибрежных районов благодаря развитой картографической поддержке; StormGeo и ABB лучше подходят для трансокеанских переходов за счет точных гидродинамических моделей. Выявлены системные недостатки: «черный ящик» алгоритмов, задержки обновления погоды, высокая стоимость подписки, проблемы кибербезопасности, неполная интеграция с электронно-картографической навигационно-информационной системой. Определены следующие ключевые тенденции: искусственный интеллект, цифровые двойники, соответствие требованиям экологического законодательства, низкоорбитальная спутниковая связь LEO и автономное судовождение. Практическая значимость заключается в обосновании рекомендаций по выбору системы в зависимости от типа судна и района плавания, а также в определении направлений дальнейших исследований — создании гибридных моделей, сочетающих физическое моделирование и машинное обучение. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание гибридных систем, объединяющих физические модели судна с адаптивными методами машинного обучения и нечеткой логикой, а также разработку стандартизированных протоколов обмена данными между береговыми центрами оптимизации и судовыми электронно-картографическими навигационно-информационными системами.

Ключевые слова: планирование маршрута судна, оптимизация перехода, электронно-картографическая навигационно-информационная система, погодная маршрутизация, индикатор углеродной интенсивности, цифровой двойник, автономное судовождение, LEO-спутниковая связь, безопасность мореплавания.

Для цитирования:

Акмайкин, Д. А. Анализ современных автоматизированных систем планирования маршрута судна: функциональные возможности, ограничения и тенденции развития / Д. А. Акмайкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 4. С. 603–613. EDN PYJPVO. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-603-613.

ANALYSIS OF MODERN AUTOMATED SHIP ROUTE PLANNING SYSTEMS: FUNCTIONAL CAPABILITIES, LIMITATIONS, AND DEVELOPMENT TRENDS

D. A. Akmaykin

Maritime State University named after Adm. G.I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

The relevance of the study is determined by the maritime industry's transition from manual route planning to semi-automated and integrated navigation systems in the context of autonomous shipping. The requirements of IMO Resolution A.893(21), SOLAS 1974, and STCW 1978 make thorough voyage planning mandatory; however,

existing systems differ in functionality and have limitations that complicate the selection of an optimal solution. The study provides a comparative analysis of leading ship route planning systems, identifying their capabilities, weaknesses, and development trends. The methodology includes analysis of the regulatory framework, technical documentation, and scientific publications, as well as comparative assessment according to the following criteria: preliminary route planning, under-keel clearance monitoring, weather routing optimization, carbon intensity accounting, and digital twin support. The results show that Wärtsilä and OneOcean are preferable for coastal navigation because of their advanced chart support, whereas StormGeo and ABB are better suited to transoceanic voyages owing to their more accurate hydrodynamic models. Common limitations include “black-box” algorithms, delays in weather-data updates, high subscription costs, cybersecurity issues, and incomplete integration with electronic chart display and information systems. Key development trends include artificial intelligence, digital twins, compliance with environmental regulations, low-Earth-orbit satellite communications, and autonomous shipping. The practical significance of the study lies in substantiating recommendations for selecting a system according to vessel type and navigation area. Further research should focus on hybrid systems combining physical vessel models with adaptive machine-learning and fuzzy-logic methods, as well as on standardized data-exchange protocols between shore-based optimization centers and shipboard ECDIS.

Keywords: ship route planning, voyage optimization, electronic chart display and information system (ECDIS), weather routing, Carbon Intensity Indicator (CII), digital twin, autonomous shipping, LEO satellite communications, maritime safety.

For citation:

Akmaykin, Denis A. "Analysis of modern automated ship route planning systems: functional capabilities, limitations, and development trends." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.4 (2026): 603–613. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-603-613.

Введение (Introduction)

Правильное и тщательное планирование перехода является обязательным условием безопасной и экономически эффективной эксплуатации морского судна. Согласно резолюции ИМО A.893(21) «Руководство по планированию рейса»¹, а также требованиям Международной конвенции СОЛАС-74 (глава V)² и МК ПДНВ-78 (глава VIII)³, каждый рейс должен быть спланирован заранее с учетом навигационных, гидрометеорологических и эксплуатационных ограничений. В Российской Федерации данные процедуры регламентированы «Рекомендациями по организации штурманской службы на судах» (РПШ-89)⁴. Нарушение этих требований приводит к необоснованно большим затратам, а иногда и к авариям. Общим вопросам планирования маршрутов и поиска оптимального пути посвящены работы отечественных ученых, в которых рассмотрены основные принципы и этапы прокладки, а также многокритериальный подход к выбору [1, 2].

За последние десятилетия произошел переход от ручной прокладки к полуавтоматическим и интегрированным навигационным системам, функционирующим в контексте концепции автономного судовождения (MASS)⁵. Крупнейшие мировые компании: Wärtsilä (панее TRANSAS), Furuno, StormGeo, ABB, а также объединенная платформа OneOcean (ChartCo + Marine Press) предлагают решения, позволяющие не только прокладывать маршрут, но и оптимизировать его с учетом погоды, течений, расхода топлива и экологических ограничений. В 2018 г. финский концерн Wärtsilä приобрел компанию TRANSAS, а в 2021 г. завершил интеграцию ее технологий, переименовав систему NAVX 6000 в Navi-Planner. В 2023 г. произошло объединение компаний ChartCo и Marine Press в единую платформу OneOcean, входящую в структуру Lloyd's Register. Несмотря на значительный прогресс каждая из систем имеет слабые стороны, ограничивающие их применение в сложных навигационных условиях.

¹ IMO Resolution A.893(21). Guidelines for Voyage Planning. London: International Maritime Organization, 1999. 12 p.

² IMO. SOLAS Consolidated Edition, 2024. Chapter V – Safety of Navigation. London: IMO, 2024.

³ Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДМНВ-78) с поправками (консолидированный текст). СПб: ЗАО «ЦНИИМФ», 2010. 806 с.

⁴ РПШ-89 — «Рекомендации по организации штурманской службы на судах» / ЗАО «ЦНИИМФ». СПб: ЗАО «ЦНИИМФ», 2011. 120 с.

⁵ IMO MSC.1/Circ.1638. Outcome of the Regulatory Scoping Exercise for the use of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS). London: IMO, 2021.

Цель настоящей работы — провести сравнительный анализ функционала четырех наиболее распространенных систем планирования маршрута, выявить их системные недостатки и определить основные тенденции развития в данной предметной области.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследование базируется на системном анализе нормативно-правовой базы (Резолюции ИМО, правила СОЛАС, ПДНВ, РШС-89), а также на изучении открытой технической документации и руководств пользователя систем Wärtsilä Navi-Planner, OneOcean PassageManager, StormGeo Bon Voyage System и ABB Ability SPOS за период 2020–2026 гг. Для сравнительной оценки использовался метод экспертного анализа по следующим критериям: наличие предварительной прокладки от порта к порту, автоматическая прокладка, контроль глубины под килем (УКС) и про света под мостами, проверка навигационных опасностей, автоматический расчет опорных точек, интеграция с ЭКНИС, наличие модели движения судна с учетом внешней среды, точный прогноз потери скорости, автоматическая оптимизация маршрута, учет углеродной интенсивности (СИ) и поддержка цифровых двойников. Обработка данных выполнена с использованием методов сравнительного и логического анализа.

Результаты (Results)

Нормативно-правовая основа и общие требования к планированию маршрута

Согласно рекомендациям ИМО, разработка судового маршрута должна включать информацию о состоянии судна, навигационных картах и пособиях, климатологических и океанографических данных, а также о доступности служб выбора маршрута. План перехода должен охватывать опасные районы, безопасную скорость, маневренные характеристики, осадку, приливные течения и прогноз гидрометеорологической обстановки.

Процесс планирования подразделяется на три этапа: предварительная прокладка (долгосрочное планирование), исполнительная прокладка (краткосрочное планирование) и оперативное маневрирование. На рис. 1 приведена обобщенная схема планирования маршрута перехода.



Рис. 1. Планирование маршрута перехода

Fig. 1. Voyage route planning

В международной практике основным документом в течение длительного времени являлось руководство «Океанские пути мира» (ГУНиО, 1980), которое в настоящее время устарело (откорректировано по Извещениям мореплавателям № 12 от 15 марта 1980 г.). Актуальным изданием ИМО

является Ship's Routing⁶, переиздаваемое каждые несколько лет. В судоходных компаниях процедуры маршрутизации закрепляются в документах системы управления безопасностью (СУБ).

Построение маршрута судна представляет собой процедуру определения оптимального трека океанского плавания, основанного на навигационно-гидрографических факторах, прогнозах погоды, состоянии моря и индивидуальных особенностях судна для конкретного перехода. Найденный путь может быть реализован с помощью использования нескольких вариантов, поэтому важно выбрать такой путь, который в указанных пределах погодных и морских условий можно обозначить как *оптимальный* (максимальная безопасность, минимальный расход топлива, минимальное время или комбинация этих факторов) [1, 2].

Анализ функциональных возможностей современных систем

1. *Wärtsilä Navi-Planner*. Система Navi-Planner (преемник TRANSAS NAVX 6000) представляет собой приложение обработки электронных карт ЭКНИС, соответствующее Резолюциям ИМО А.893(21) и А.916(22)⁷. Функционал включает предварительную прокладку от порта к порту, автоматическую прокладку, контроль глубины под килем (УКС) и просвета под мостами, проверку навигационных опасностей, автоматический расчет опорных точек, экспорт / импорт маршрутов и интеграцию с ЭКНИС Wärtsilä⁸. Интерфейс системы показан на рис. 2.

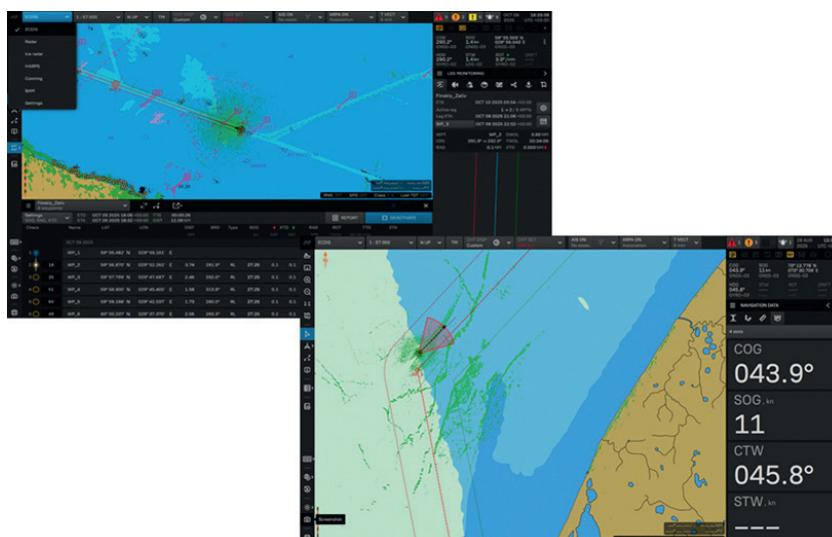


Рис. 2. Интерфейс системы Wärtsilä Navi-Planner
Fig. 2. Wärtsilä Navi-Planner system interface

Погодная функциональность использует данные ECMWF также других мировых центров (давление, ветер, волнение, тропические циклоны, ледовые границы). Предварительная прокладка основана на информации, получаемой по ходу маршрута в опорных точках, включая метеорологические и гидрологические данные. Временные параметры маршрута рассчитываются с учетом ограничения скорости для каждого плеча, поверхностного и приливного течения.

Особенности функционирования системы:

- ограниченная погодная модель (потеря скорости от волнения рассчитывается менее детально, чем у специализированных конкурентов; течения основаны на климатических средних, а не реальных данных буев);
- слабая автоматизация выбора альтернативных маршрутов (в основном одиночный маршрут, необходим ручной ввод для сравнения);

⁶ IMO. Ship's Routing, 2025 Edition. London: IMO, 2025.

⁷ IMO Resolution A.916(22). Guidelines for the recording of events related to navigation. London: IMO, 2002.

⁸ Wärtsilä. Navi-Planner product description. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.wartsila.com/marine/products/marine-navigation-solutions/navi-planner> (дата обращения: 10.03.2026).

– высокие требования к вычислительным ресурсам (полнофункциональная версия с 3D-визуализацией рельефа дна и динамическим УКС требует мощного компьютера, что проблематично на старых судах).

2. *OneOcean PassageManager* (платформа *OneOcean 2025*). Платформа OneOcean, образованная в 2023 г. объединением ChartCo и Marine Press (входит в структуру Lloyd's Register), предлагает флагманский продукт PassageManager⁹. Основным назначением являются: подбор и корректура электронных карт (ENC / SENC) вдоль маршрута, а также обеспечение соответствия нормативным требованиям. PassageManager позволяет судоводителям в автоматизированном режиме строить маршрут судна, используя предварительно составленные маршруты, с указанием расстояний (рис. 3).

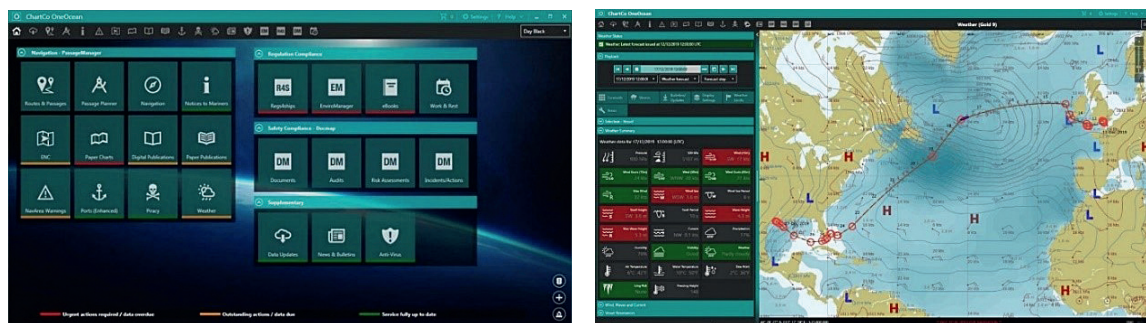


Рис. 3. Пример построения маршрута в программе OneOcean

Fig. 3. Example of route planning in OneOcean

Программа обеспечивает полную интеграцию со сторонними приложениями, например TotalTide Адмиралтейства Великобритании, для расчета приливов и УКС. В 2025 г. представлена версия OneOcean 2025 с расширенными возможностями: прогнозы погоды, приливов, течений, а также решение Voyage Performance & Optimisation для сокращения выбросов и оптимизации флота.

Недостатки системы:

- основной фокус на управлении картами, а не на оптимизации маршрута (погодная маршрутизация добавлена позже и уступает специализированным решениям);
- отсутствие собственной модели движения судна (расчеты ETA и расхода топлива выполняются по упрощенным формулам без учета гидродинамики);
- проблемы интеграции после слияния компаний (конфликты форматов между старой версией PassageManager и новой платформой, дублирование функций).

3. *StormGeo Bon Voyage System (BVS)*. BVS — продукт калифорнийской компании StormGeo¹⁰, ориентированный на оптимизацию морского перехода по погодным условиям и расходу топлива. Используется запатентованная климатологическая модель движения судна (CSR), которая прогнозирует потерю скорости на основе прогноза погоды и течений. Система учитывает зоны пиратских нападений, требования по содержанию серы в топливе (MARPOL), а также интегрируется с CII Dashboard для расчета углеродной интенсивности. Пример расчета маршрута в BVS приведен на рис. 4.

BVS предлагает алгоритм оптимизации движения по маршруту с настройкой зависимости расхода топлива от скорости. Пользователь может выбрать критерии: скорость, экономичность, минимизация CO₂. С помощью широкополосной связи, включая ЛЕО-спутники, система направляет на судно в сжатом формате информацию о погоде и состоянии океана, что позволяет штурманам заранее просматривать потенциальные проблемы (рис. 5).

⁹ OneOcean. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.naveetechnology.com/oneocean/> (дата обращения: 10.03.2026).

¹⁰ StormGeo Informed by nature, powered by technology. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://stormgeo.com/> (дата обращения: 10.03.2026).

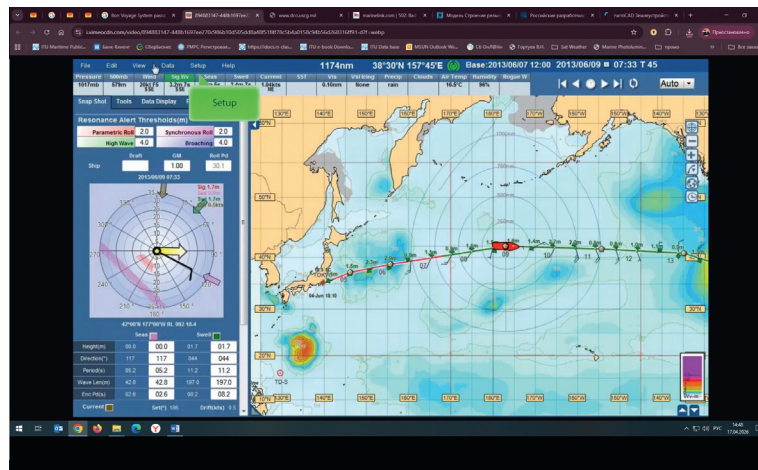


Рис. 4. Расчет маршрута в программе Bon Voyage System
Fig. 4. Route calculation in the Bon Voyage System

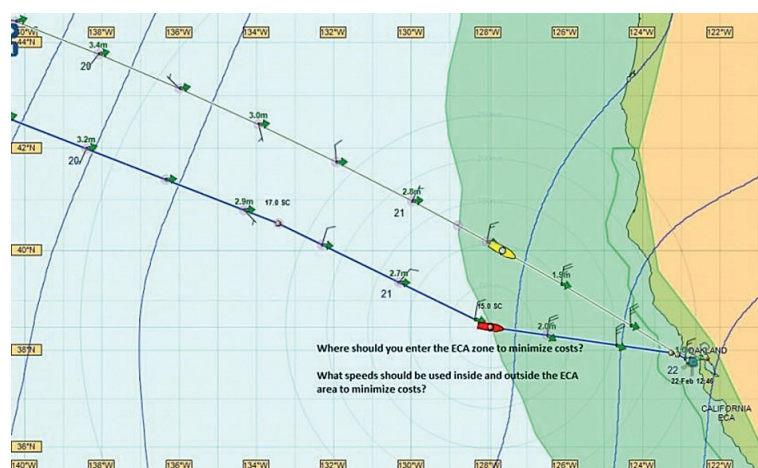


Рис. 5. Отображение текущей погоды и зон движения с использованием топлива с пониженным содержанием серы в BVS
Fig. 5. Display of current weather conditions and navigation areas using low-sulfur fuel in BVS

Слабые стороны:

- «черный ящик» алгоритмов (CSR-модель не раскрывается, капитан не может понять логику рекомендаций, что снижает доверие);
- задержки обновления данных при плохой спутниковой связи (до 6–12 ч, что критично при быстром изменении погоды);
- ограниченный учет навигационных опасностей в прибрежных водах (система ориентирована на открытый океан);
- отсутствие динамического расчета УКС с учетом приливов и волнения (не подходит для судов с большой осадкой в стеснённых водах).

4. **ABB Ability SPOS.** Система Ship Performance Optimisation System (SPOS)¹¹ изначально разработана Meteogroup, в 2024 г. приобретена ABB. SPOS рассчитывает оптимальный маршрут с учетом волнения, течений, ветра и характеристик судна. Использует 20-летний опыт в области мореходных качеств и цифровой двойник через платформу OCTOPUS. Система позволяет экспортировать маршрут в ЭКНИС главных производителей. Основной интерфейс SPOS показан на рис. 6.

¹¹ ABB Marine & Ports. ABB Ability™ Ship Performance Optimisation System (SPOS). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://new.abb.com/marine/systems-and-solutions/digital-solutions/routing-services> (дата обращения: 15.03.2026).

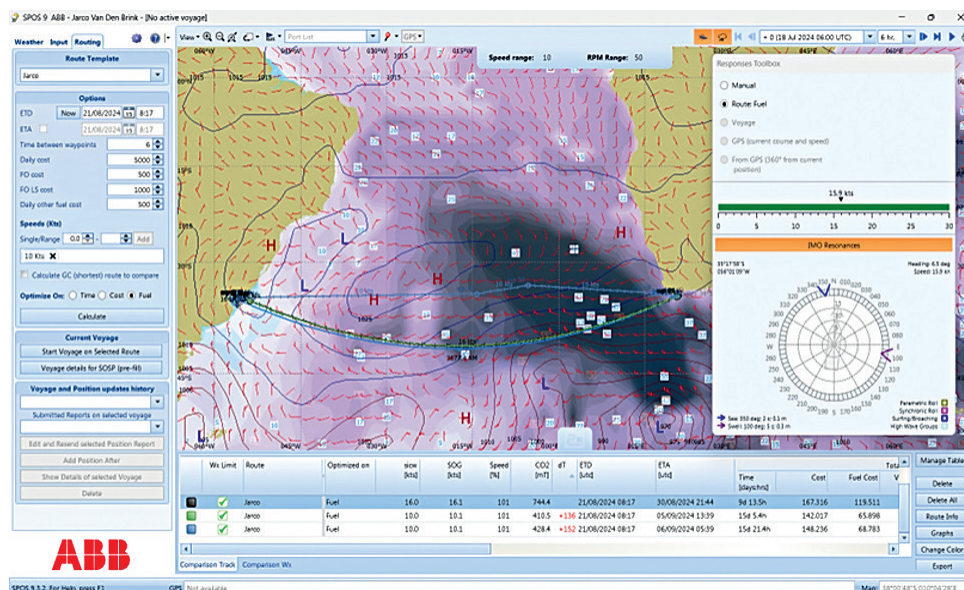


Рис. 6. Основной интерфейс системы ABB Ability
Fig. 6. Main interface of the ABB Ability system

Компания ABB обеспечивает интеграцию своих продуктов с программным обеспечением основных мировых производителей ЭКНИС. Капитан прокладывает маршрут в ЭКНИС, экспортирует его в SPOS, система предлагает ряд оптимальных маршрутов с учетом предпочтений и ограничений, после чего выбранный маршрут загружается обратно в ЭКНИС.

Ограничения:

- сложность настройки модели судна (требуется до 200 параметров, включая данные ходовых испытаний, что отсутствует у многих судовладельцев);
- проблемы с технической поддержкой после перехода от MeteoGroup к ABB (устаревшая документация, время ответа до пяти дней);
- отсутствие прямой интеграции с некоторыми популярными ЭКНИС (Furuno, Raymarine – требуется конвертация);
- расхождение цифрового двойника с реальностью для судов старше 10 лет (ошибка 8–10 % по расходу топлива из-за износа корпуса и винта).

Сравнительная характеристика функционала

На основе проведенного анализа составлена сводная таблица, отражающая наличие ключевых функций в каждой системе.

Сравнение функций систем маршрутизации Comparison of the Functions of Route Planning Systems

Функция	Wärtsilä Navi-Planner	OneOcean PassageManager	StormGeo BVS	ABB SPOS
Предварительная прокладка от порта к порту	+	+	+	+
Автоматическая предварительная прокладка	+	–	–	–
Контроль УКС и просвета под мостами	+	+(с TotalTide)	–	+
Проверка навигационных опасностей	+	+	–	+

Окончание таблицы

Автоматический расчет опорных точек	+	–	–	–
Интеграция с ЭКНИС	+	+	–	+
Модель движения судна с учетом внешней среды	–	–	+	+
Точный прогноз потери скорости	–	–	+	+
Автоматическая оптимизация маршрута	+	+ (OneOcean 2025)	+	+
Учет СП и экологических требований	–	+ (Voyage Perf. & Optim.)	+ (CII Dashboard)	+ (ABB Ability)
Поддержка цифровых двойников	–	–	–	+ (OCTOPUS)

Примечание. «+» — функция поддерживается, «–» — не поддерживается.

Тенденции развития систем планирования маршрутов

Анализ рынка и научных публикаций позволяет выделить пять ключевых тенденций, определяющих развитие систем маршрутизации на период 2025–2030 гг.

1. *Искусственный интеллект и машинное обучение.* ИИ используется для непрерывной корректировки маршрута, скорости и ETA. По данным MarketsandMarkets (2025), рынок ИИ-решений для оптимизации маршрутов растет с CAGR 12,5 % и достигнет 1,7 млрд долл. в 2026 г.¹². В работе [3] предложен метод оптимизации планирования рейса на основе обучения с подкреплением, учитывающий прогнозирование времени стоянки в порту, однако существуют следующие проблемы: необъяснимость решений («черный ящик»), чувствительность к выбросам в обучающих данных и высокие затраты на переобучение для каждого типа судна.

2. *Цифровые двойники (Digital Twins).* Цифровые двойники позволяют прогнозировать расход топлива, избегать условий высокого сопротивления и уточнять ETA. Система поддержки решений MUTE-DSS на основе цифровых двойников предназначена для минимизации подводного радиационного шума при планировании рейса [4]. Недостатки: накопление ошибок при длительном рейсе (более 10–15 сут), сложность верификации и высокие требования к вычислительным ресурсам (облачные расчеты, требующие постоянной спутниковой связи). В работах [5–7] рассмотрены методологические вопросы создания цифровых двойников акватории и прогнозирования отказов навигационных систем.

3. *Углеродная интенсивность (СП) и экологическое соответствие.* Требования ИМО по СП и EEXI кардинально изменили подход к планированию. Современные системы обязаны симулировать СП-рейтинг и оптимизировать маршрут для снижения выбросов. В исследовании [8] показано, что ужесточение регулирования СП в стохастических условиях трампового судоходства может парадоксальным образом увеличить выбросы, и предложена вероятностная основа маршрутизации. Статья [9] представляет вероятностную структуру маршрутизации судов с учетом соответствия СП с использованием улучшенного алгоритма динамического программирования. Противоречия: оптимизация по СП часто требует снижения скорости на 10–20 %, что увеличивает время рейса и может нарушить контрактные обязательства.

4. *Низкоорбитальная спутниковая связь (LEO).* Развертывание Starlink, OneWeb и Amazon Kuiper обеспечило высокоскоростной доступ с низкой задержкой. Исследование [10] показывает, что использование сигналов LEO-спутников позволяет повысить точность позиционирования в Арктике с 1 км до 27 м. В 2026 г. Marlink запустил сервис Sealink Multi-LEO. Это позволяет

¹² Artificial Intelligence (AI) in Maritime Transport Market Report 2026, 2026. — 250 p.

получать обновления погоды и пересчитывать маршруты в реальном времени, а не с периодичностью 4–24 ч. Уязвимости: сигнал может глушиться в зонах конфликтов, высокая абонентская плата (5000–10000 долл. в месяц на судно) и микроразрывы при переключении между спутниками.

5. *Автономное судовождение (MASS)*. Разработка ИМО Кодекса MASS создает возможности для применения автономии. На сессии MSC 110 (2025) ИМО завершена разработка 18 глав необязательного Кодекса MASS; ожидается принятие в 2026 г., обязательный статус — с 2032 г. В апреле 2026 г. ClassNK выдал первую в мире нотацию MASS контейнеровозу Genbu. Проблемы: юридическая неопределенность (капитан остается ответственным), плохое распознавание неподвижных объектов при волнении более 4 баллов, высокая стоимость модернизации (2–5 млн долл. на судно).

Обсуждение (Discussion)

Проведенный анализ показал, что ни одна из рассмотренных систем не является универсальной. Выбор конкретного решения должен определяться типом судна, характерными маршрутами и готовностью судовладельца инвестировать в инфраструктуру (связь, датчики, обучение персонала):

- для прибрежного плавания и районов с высокой плотностью навигационных опасностей предпочтительными являются Wärtsilä Navi-Planner и OneOcean PassageManager, имеющие собственную базу откорректированных карт и функции UKC;
- для трансокеанских переходов более подходят StormGeo BVS и ABB SPOS, предоставляющие развитые погодные модели и учет гидродинамики судна.
- при необходимости соблюдения экологических требований (CII, EU ETS, FuelEU Maritime) оптимальным выбором являются системы с интеграцией углеродной отчетности (OneOcean 2025, StormGeo BVS с CII Dashboard, ABB Ability SPOS).

С учетом санкционных ограничений для российского флота (отключение от западных серверов, блокировка обновлений) критически важной является возможность работы с альтернативными картографическими базами (например, ГУНиО) и локальными прогностическими моделями (Гидрометцентр РФ). Среди рассмотренных систем наилучшую адаптируемость к такой работе показывают Wärtsilä Navi-Planner (возможность загрузки карт ГУНиО) и ABB SPOS (наличие автономного режима), однако необходимо развитие отечественных решений (например, на базе ГИС «Невод» или импортонезависимых ЭКНИС).

Общей проблемой остается недостаточная интеграция между системами оптимизации и судовой ЭКНИС: даже в современных решениях необходим ручной экспорт / импорт, что создает риск ошибок. Перспективным направлением является разработка открытых интерфейсов API и стандартов обмена маршрутами (например, на базе S-421 или RTZ). Также необходима гибридная методология, сочетающая физическое моделирование (цифровые двойники) с машинным обучением для адаптивной коррекции прогнозов в реальном времени на основе судовых измерений (расход топлива, крен, вибрация). Применение аппарата нечеткой логики и многокритериального подхода, как показано в работах [1, 2], позволяет строить маршрут с различной степенью экономичности, скорости и безопасности, что особенно ценно для многоцелевых судов.

Заключение (Conclusion)

В статье выполнен систематический анализ четырех современных автоматизированных систем планирования маршрута судна: Wärtsilä Navi-Planner, OneOcean PassageManager, StormGeo Bon Voyage System и ABB Ability SPOS. Выявлены их сильные и слабые стороны, составлена сравнительная таблица функционала. Показано, что для прибрежных районов предпочтительны системы с развитой картографической поддержкой, для открытого океана — системы с точными погодными моделями и учетом индивидуальных характеристик судна.

Определены ключевые тенденции развития: искусственный интеллект, цифровые двойники, углеродная интенсивность (CII), низкоорбитальная спутниковая связь и автономное судовождение. Каждая из этих тенденций имеет как значительный потенциал повышения безопасности

и эффективности, так и серьезные ограничения (необъяснимость алгоритмов, накопление ошибок, высокая стоимость, юридическая неопределенность). Предложены рекомендации по выбору с учетом санкционных рисков для российского флота.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание гибридных систем, объединяющих физические модели судна с адаптивными методами машинного обучения и нечеткой логикой, а также на разработку стандартизированных протоколов обмена данными между береговыми центрами оптимизации и судовыми ЭКНИС. Особую актуальность приобретает создание отечественной импортонезависимой системы планирования маршрутов, интегрированной с российской спутниковой связью («Гонец», «Скиф») и картографическим обеспечением ГУНиО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акмайкин Д. А. Основные принципы и этапы планирования маршрутов судов / Д. А. Акмайкин, В. В. Бочарова, А. В. Гамс // Эксплуатация морского транспорта. — 2023. — Т. 1. — С. 50–54. — EDN FQEEBR. — DOI: 10.34046/aumsuomt106/8.
2. Акмайкин Д. А. Поиск оптимального пути судна на основе различных критериев / Д. А. Акмайкин, В. В. Бочарова, С. Ф. Ключева, А. В. Гамс // Эксплуатация морского транспорта. — 2023. — № 3 (108). — С. 72–77. — EDN KNLQGQ. — DOI: 10.34046/aumsuomt108/11.
3. Park Y. Development of a Reinforcement Learning-Based Ship Voyage Planning Optimization Method Applying Machine Learning-Based Berth Dwell-Time Prediction as a Time Constraint / Y. Park, S. Kim, J. Eom, S. Kim // Journal of Marine Science and Engineering. — 2026. — Vol. 14. — № 1. — P. 43. 0.3390/jmse14010043. — EDN YLAVFC. — DOI: 10.3390/jmse14010043.
4. Venkateshwaran A. MUTE-DSS: A Digital-Twin-Based Decision Support System for Minimizing Underwater Radiated Noise in Ship Voyage Planning / A. Venkateshwaran, I. K. Deo, R. K. Jaiman // Ocean Engineering. — 2026. — Vol. 343. — Part 3. — 123343. — EDN HHHRMS. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.123343.
5. Розенберг И. Н. Методы формирования цифрового двойника акватории для навигации беспилотных судов / И. Н. Розенберг, С. С. Соколов, И. А. Дубчак // Мир транспорта. — 2023. — Т. 21. — № 6 (109). — С. 6–13. — EDN JJUBAU. — DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-6-1.
6. Ермаков С. В. Цифровой двойник судна в период эксплуатации и оценка возможности его использования в целях построения и реализации траектории морских автономных надводных судов / С. В. Ермаков, Е. В. Мулина, Н. Ж. Малинин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: морская техника и технология. — 2025. — № 2. — С. 48–58. — EDN PTTCME. — DOI: 10.24143/2073-1574-2025-2-48-58.
7. Lv Zh. Digital Twins in the Marine Industry / Zhihan Lv, Haibin Lv, Mikael Fridenfalk // Electronics. — 2023. — Vol. 12. — Is. 9. — P. 2025. — EDN XQIXNM. — DOI: 10.3390/electronics12092025.
8. Yang H. Tramp Ship Routing and Scheduling with Integrated Carbon Intensity Indicator (CII) Optimization / H. Yang, F. Ren, J. Yin, S. Wang, R.U. Khan // Journal of Marine Science and Engineering. — 2025. — Vol. 13, № 4. — Pp. 752. — EDN EXRMHP. — DOI: 10.3390/jmse13040752.
9. Wei Q. A CII-oriented ship routing framework based on probabilistic decarbonization compliance / Q. Wei, Y. Liu, Y. Dong, M. Chen // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. — 2025. — Vol. 17. — P. 100670. — EDN ZIFHEG. — DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2025.100670.
10. Гаврильчук И. М. Навигационные спутниковые системы на низкой околоземной орбите: современные зарубежные разработки / И. М. Гаврильчук, Е. Ю. Ивженко, Н. В. Леонидов // Вестник наук. — 2026. — Т. 2. — № 3 (96). — С. 391–404. — EDN LJPQOY.

REFERENCES

1. Akmaykin, D. A., V. V. Bocharova and A. V. Gams. "Route planning." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1 (106) (2023): 50–54. DOI: 10.34046/aumsuomt106/8.
2. Akmaykin, D. A., V. V. Bocharova, S. F. Klyueva and A. V. Gams. "Search for the optimal way of the vessel based on various criteria." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3 (108) (2023): 72–78. DOI: 10.34046/aumsuomt108/11.
3. Park, Y., S. Kim, J. Eom and S. Kim. "Development of a Reinforcement Learning-Based Ship Voyage Planning Optimization Method Applying Machine Learning-Based Berth Dwell-Time Prediction as a Time Constraint." *Journal of Marine Science and Engineering* 14.1 (2026). DOI: 10.3390/jmse14010043.

4. Venkateshwaran, A., I. Kant Deo and R. K. Jaiman. "MUTE-DSS: A digital-twin-based decision support system for minimizing underwater radiated noise in ship voyage planning." *Ocean Engineering* 343 (2026): 123343. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.123343.
5. Rozenberg, I. N., S. S. Sokolov and I. A. Dubchak. "Methods for development of a digital twin of the water area for navigation of unmanned vessels." *World of Transport and Transportation* 21.6 (109) (2023): 6–13. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-6-1.
6. Ermakov, S. V., E. V. Mulina and N. Zh. Malinin. "Digital twin of a vessel during operation and assessment of its possible use for the purpose of constructing and implementing of maritime autonomous surface ships trajectory." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2025): 48–58. DOI: 10.24143/2073-1574-2025-2-48-58.
7. Lv, Z., H. Lv and M. Fridenfalk. "Digital Twins in the Marine Industry." *Electronics* 12.9 (2023). DOI: 10.3390/electronics12092025.
8. Yang, H., R. U. Khan et al. "Tramp Ship Routing and Scheduling with Integrated Carbon Intensity Indicator (CII) Optimization." *Journal of Marine Science and Engineering* 13.4 (2025). DOI: 10.3390/jmse13040752.
9. Wei, Q., Y. Liu, Y. Dong and M. Chen. "A CII-oriented ship routing framework based on probabilistic decarbonization compliance." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 17 (2025): 100670. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2025.100670.
10. Gavril'chuk, I. M., E. Yu. Ivzhenko and N. V. Leonidov. "Low earth orbit navigation satellite systems: current foreign developments." *Science Bulletin* 2.3 (96) (2026): 391–405.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Акмайкин Денис Александрович —
кандидат физико-математических наук,
доцент
Морской государственный университет
им. адм. Г. И. Невельского
690059, Россия, Приморский край,
г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: akmaykin@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akmaykin, Denis A. —
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor
Maritime State University
named after Adm. G.I. Nevelskoy
50a, Verkhneportovaya St.,
Vladivostok, 690059, Russia
e-mail: akmaykin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 06 мая 2026 г.
Received: May 6, 2026.

МЕТОДЫ НЕЙРОСЕТЕВОГО СЛИЯНИЯ ДАННЫХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ В СУДОВОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА

Н. Д. Ермаков, В. В. Астреин

ФГБУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»,
г. Новороссийск, Российская Федерация

В работе рассмотрена задача повышения достоверности морского ситуационного мониторинга на основе согласования данных автоматической идентификационной системы и радиолокационной станции. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения надежной навигационной обстановки в условиях неполноты и противоречивости данных от разнородных сенсорных источников. Проведен анализ реальных навигационных логов судна-цели, в ходе которого построены независимые треки движения по данным каждой из систем и вычислены расхождения в координатах, скорости и временных метках. Показано, что данные двух систем имеют различную частоту обновления и характеризуются систематическим пространственным смещением, что существенно затрудняет их непосредственное совместное использование без предварительной обработки. Предложена нейросетевая модель адаптивного слияния навигационных данных, способная выполнять интеллектуальную фильтрацию поступающей информации и выявлять аномалии без жесткого априорного усреднения входных сигналов. Архитектура модели включает два независимых входных канала обработки: канал радиолокационных данных и канал данных АИС соответственно, а также блок адаптивного слияния (фьюжна), реализующий динамическое перераспределение доверительных коэффициентов в зависимости от текущей неопределенности каждого из источников. Реализован механизм выявления нестационарности навигационных данных на основе анализа статистики ошибок реконструкции с применением дисперсионного критерия неопределенности, позволяющего в режиме реального времени оценивать качество поступающих измерений и адаптивно корректировать веса источников. Экспериментальная проверка на реальных навигационных данных продемонстрировала работоспособность предложенной нейросетевой модели адаптивного слияния и возможность формирования согласованной траектории движения судна-цели на основе динамического перераспределения коэффициентов доверия между источниками. Полученные результаты подтверждают функциональность предложенной архитектуры и ее применимость для решения навигационных задач.

Ключевые слова: морской интеллектуальный мониторинг, нейросетевая модель, слияние навигационных данных, автоматическая идентификационная система, радиолокационные данные, автоматическая радиолокационная прокладка, аномалии, согласование, адаптивное взвешивание, дисперсионный критерий, ситуационная осведомленность.

Для цитирования:

Ермаков, Н. Д. Применение методов нейросетевого слияния данных автоматической идентификационной системы и радиолокационной станции в судовой интеллектуальной системе мониторинга / Н. Д. Ермаков, В. В. Астреин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 4. С. 614–624. EDN NWBMQH. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-614-624.

NEURAL NETWORK-BASED DATA FUSION METHODS FOR AUTOMATIC IDENTIFICATION SYSTEM AND RADAR DATA IN A SHIPBOARD INTELLIGENT MONITORING SYSTEM

N. D Ermakov, V. V. Astrein

Admiral Ushakov Maritime State University,
Novorossiysk, Russian Federation

The study addresses the problem of improving the reliability of maritime situational monitoring by reconciling data from the Automatic Identification System (AIS) and radar. The relevance of the study stems from the need to ensure a reliable navigational picture when data from heterogeneous sensor sources are incomplete or contradictory. Real navigational logs of a target vessel were analysed; independent vessel tracks were constructed from each system, and discrepancies in position, speed, and timestamps were calculated. The results show that the two systems have different update rates and exhibit a systematic spatial offset, which substantially complicates their direct joint use without preprocessing. A neural network model for adaptive navigation data fusion is proposed. The model performs intelligent filtering of incoming data and detects anomalies without fixed a priori averaging of the input signals. Its architecture comprises two independent processing branches, one for radar data and the other for AIS data, and an adaptive fusion block that dynamically redistributes confidence weights according to the current uncertainty of each source. A mechanism for detecting instability in navigation data was implemented by analysing reconstruction-error statistics using a variance-based uncertainty criterion. This enables real-time assessment of incoming measurement quality and adaptive adjustment of source weights. Experimental validation on real navigational data demonstrated the operability of the proposed adaptive fusion model and its ability to generate a consistent target-vessel trajectory by dynamically redistributing confidence weights between the sources. The results confirm the functionality of the proposed architecture and its applicability to navigation tasks.

Keywords: intelligent maritime monitoring, neural network model, navigation data fusion, Automatic Identification System (AIS), radar data, Automatic Radar Plotting Aid (ARPA), anomalies, data alignment, adaptive weighting, variance criterion, situational awareness.

For citation:

Ermakov, Nikita D and V. V. Astrein. "Neural network-based data fusion methods for automatic identification system and radar data in a shipboard intelligent monitoring system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.4 (2026): 614–624. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-614-624.

Введение (Introduction)

Концепция системы поддержки принятия решений (СППР) для предупреждения столкновений судов на морских автономных надводных судах (МАНС) должна строиться на основе разрабатываемых методов повышения надежности и точности информации, получаемых с помощью технических средств судовождения в подсистеме интеллектуального мониторинга системы поддержки принятия решений [1]. Такой мониторинг возможен при комплексной обработке данных от судовой автоматической идентификационной системы (АИС) и судовой радиолокационной станции с функцией автоматической радиолокационной прокладки (РАДАР / САРП).

Исследования временных рядов параметров судов-целей показали, что, как правило, данные АИС и РАДАР / САРП не совпадают по определению координат судов-целей, существуют аномалии, выбросы и сбои параметрических данных в режиме реального времени [2]. Кроме того, анализ навигационных логов АИС и РАДАР / САРП показывает, что их данные обладают различной частотой обновления (дискретностью) и подвержены смещениям [3]. АИС, основанная на спутниковом позиционировании и цифровом радиообмене сообщениями, имеет различную дискретность обновления информации, которая зависит от скорости судна-цели, количества судов-целей, распределенных в некотором районе плавания, а также различных явлений при распространении радиоволн. Радиолокационные измерения, напротив, обеспечивают более стабильную частоту обновления данных, но подвержены значительному влиянию шумов окружающей среды. Классические методы фильтрации и согласования для АИС и РАДАР / САРП (например, фильтр Калмана и байесовское усреднение) в большинстве случаев предполагают априорное задание модели движения судна [4].

В условиях реальной навигационной обстановки статистика шумов нестационарна, а параметры шумовых моделей могут существенно меняться во времени, что ограничивает применимость классических подходов с фиксированными ковариационными матрицами, требуя использования адаптивных и обучаемых методов обработки получаемой информации. Перспективность нейросетевых подходов в навигационных задачах подтверждается также в смежных исследованиях [5]. В этой связи представляют интерес разработки нейросетевой модели адаптивного слияния данных (фьюжн) АИС и РАДАР / САРП — стратегия объединения информации из нескольких источников, подстраиваемая под качество и характер самих данных, т. е. способная выявлять аномалии

и формировать координаты движения судна-цели в реальном времени. Временная синхронизация данных АИС и РАДАР / САРП выполняется предварительно на этапе подготовки данных.

В рамках исследования были проанализированы реальные логи судна, содержащие временные ряды параметров, полученных от АИС и РАДАР / САРП. На основе синхронизации данных построены два независимых трека, рассчитаны пространственные и временные расхождения, выявлены характерные аномалии. Полученные результаты послужили основой для разработки нейросетевой модели, реализующей адаптивное перераспределение доверительных коэффициентов между источниками в зависимости от статистики ошибок реконструкции временных последовательностей.

Таким образом, цель исследования заключается в разработке и экспериментальной проверке нейросетевого метода адаптивного слияния навигационных данных АИС и РАДАР / САРП, целью которого является формирование согласованной оценки положения судна-цели на основе динамического перераспределения доверия между каналами.

Научная новизна работы заключается в использовании нейросетевого подхода для согласования двух разнородных навигационных потоков в условиях нестационарных шумовых характеристик и вероятностных искажений. Практическая значимость работы состоит в возможности интеграции предложенной модели в системы поддержки принятия решений для расхождения судов в соответствии с требованиями МППСС-72 [5].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Экспериментальные данные получены в ходе реального навигационного наблюдения в акватории Индийского океана вблизи южного побережья острова Шри-Ланка (район координат 7 с. ш., 77° в. д.). В качестве судна-цели использовался газовоз PALU LNG (IMO 9636735), регистрация данных осуществлялась с борта судна BRATSK (IMO 9411020), оснащенного судовой АИС и радиолокационной станцией с функцией САРП.

Запись данных велась с частотой 1 Гц в интервале с 04:47:19 по 04:48:45 UTC, что соответствует 87 последовательным временным отметкам, указанным в приведенной таблице.

Фрагмент синхронизированных данных АИС и РАДАР/САРП

Fragment of Synchronized AIS and Radar/ARPA Data

UTC	lat_AIS	lon_AIS	SOG_kn	lat_RADAR	lon_RADAR	STW_kn	offset_m
4:47:19	7,01392	77,11486	6,9	7,01935	77,11227	7,9	668,0
4:47:20	7,01392	77,11486	6,9	7,01935	77,11195	7,9	713,3
4:47:21	7,01409	77,11486	6,9	7,01935	77,11195	7,9	681,4
4:47:22	7,01392	77,11486	6,9	7,01935	77,11195	7,9	698,4
4:47:23	7,01392	77,11486	6,9	7,01982	77,11162	7,9	730,8
4:47:24	7,01392	77,11486	6,9	7,01982	77,11162	7,9	730,8
4:47:25	7,01392	77,11486	6,9	7,01982	77,11162	7,9	730,8
4:47:26	7,01392	77,11486	6,9	7,01965	77,11180	7,9	705,3
4:47:27	7,01392	77,11486	6,9	7,01965	77,11180	7,9	705,3
4:47:28	7,01392	77,11486	6,9	7,01953	77,11203	8,0	682,8
4:47:29	7,01392	77,11486	6,9	7,01953	77,11203	8,0	682,8
4:47:30	7,01392	77,11486	6,9	7,01953	77,11203	8,1	682,8
4:47:31	7,01392	77,11486	6,9	7,01953	77,11178	8,2	694,4
4:47:32	7,01425	77,11426	7,	7,01953	77,11178	8,2	648,3
4:47:33	7,01425	77,11426	7,0	7,01982	77,11162	8,2	684,6

При размерности входного вектора 16 отсчетов (длительность окна 15 с) формируется 71 обучающий пример вида $X(t-15), \dots, X(t) \rightarrow X(t+1)$. Обучающие образцы формировались последовательно методом скользящего окна по всему временному ряду из промежутка $[0; 65]$ без перемешивания между выборками.

Данные были разделены следующим образом:

- 50 примеров ($\approx 70\%$) — обучающая выборка;
- семь примеров ($\approx 10\%$) — тестовая выборка;
- оставшиеся 14 примеров ($\approx 20\%$) — валидационная выборка.

Таким образом, проверка работы модели на независимых данных выполнялась на тестовом фрагменте длительностью 7 с. Каждое измерение представлялось в формате градусы и минуты (например, $07^{\circ}00.8352'N, 077^{\circ}06.8914'E$).

Вначале был выполнен парсинг логов АИС и РАДАР / САРП с последующим преобразованием координат в десятичные градусы. Перед выполнением временной синхронизации исходные навигационные параметры были нормализованы с целью приведения разнородных величин к единому масштабу.

Нормализация координат и скоростей выполнялась по методу линейного масштабирования ($\min\text{--}\max$) в диапазоне $[0\text{--}1]$ по формуле

$$x^{\text{norm}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (1)$$

где x — исходное значение параметра;

$x_{\min}, x_{\max}$ — минимальное и максимальное значения соответствующего параметра, определенные по всей выборке (87 точек) до ее разбивки на train/val/test , что обеспечивает попадание всех данных в диапазон $[0; 1]$.

На основе преобразованных координат были построены два трека движения судна: по данным АИС и РАДАР / САРП. Визуальный анализ показал наличие систематического пространственного смещения: трек РАДАР / САРП находился севернее и западнее, чем трек АИС, а также отличался более высокой динамикой изменения координат.

Для количественной оценки рассогласования применялась гаверсинусная формула, позволяющая вычислить расстояние между координатами AIS и RADAR на каждой временной отметке:

$$d = 2R \cdot \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta\varphi}{2} \right) + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \sin^2 \left(\frac{\Delta\lambda}{2} \right)} \right), \quad (2)$$

где d — расстояние между точками (например, в метрах);

R — радиус Земли (≈ 6371 км или $6\,371\,000$ м);

φ_1, φ_2 — широты первой и второй точки (в радианах);

λ_1, λ_2 — долготы первой и второй точки (в радианах);

$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$;

$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$.

Среднее пространственное расхождение между треками составило около 700 м, при этом временной анализ показал, что АИС передает обновления с периодом 1–2 с, а РАДАР / САРП — практически в реальном времени (до 10 Гц с усреднением). Таким образом, данные двух систем имеют различную частоту дискретизации, что приводит к временным сдвигам и искажению траектории при прямом сопоставлении. Кроме того, наблюдались аномальные точки, вызванные потерей GPS-сигнала АИС и влиянием шумов радиолокационных измерений. Эти особенности были учтены при построении обучающей выборки для последующего нейросетевого анализа.

Общий входной вектор модели определялся в виде

$$\mathbf{X}(t) = \begin{pmatrix} \text{LAT}_{\text{AIS}}(t), \text{LON}_{\text{AIS}}(t), \text{SOG}_{\text{AIS}}(t), \text{LAT}_{\text{RAD}}(t), \text{LON}_{\text{RAD}}(t), \text{STW}_{\text{RAD}}(t); \\ \Delta t(t) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $LAT_{AIS}(t), LON_{AIS}(t)$ — соответственно широта и долгота судна по данным АИС в момент времени t ;

$SOG_{AIS}(t)$ — скорость над грунтом по АИС;

$LAT_{RAD}(t), LON_{RAD}(t)$ — координаты судна по данным РАДАР / САРП;

$STW_{RAD}(t)$ — скорость по радиолокационному каналу;

$\Delta t(t)$ — временной сдвиг между измерениями АИС и РАДАР / САРП.

Выходной вектор модели определялся в виде

$$Y(t) = (LAT_F(t+1), LON_F(t+1)), \quad (4)$$

где $LAT_F(t+1), LON_F(t+1)$ — прогнозируемое положение судна на следующем временном шаге $t+1$.

Таким образом, нейросетевая модель решает задачу прогноза и согласования координат судна на шаге $t+1$ по совокупности текущих измерений АИС и РАДАР / САРП.

Структура разработанной нейросетевой модели адаптивного слияния данных представлена на рисунке. Модель имеет двухканальную архитектуру, в которой данные АИС и РАДАР / САРП обрабатываются раздельно с последующим объединением [6]. На вход каждой ветви подается временной ряд длиной 15 с: $LAT(t-15:t), LON(t-15:t), V(t-15:t)$, а не единичные значения.

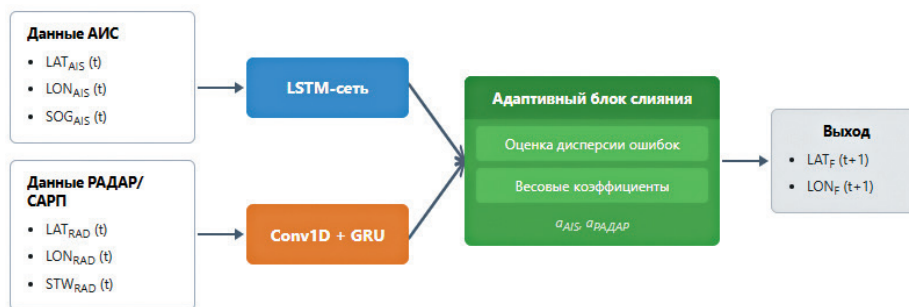


Рис. 1. Структурная схема нейросетевой модели адаптивного слияния данных АИС и РАДАР / САРП

Fig. 1. Block Diagram of the Neural Network Model for Adaptive Fusion of AIS and Radar/ARPA Data

Входные данные АИС (координаты и скорость над грунтом) поступают в рекуррентную LSTM-сеть, предназначенную для анализа временной динамики навигационных параметров и выявления задержек и пропусков сообщений. Данные РАДАР / САРП (координаты и скорость) обрабатываются сверточно-рекуррентным блоком Conv1D+GRU, обеспечивающим подавление шумов радиолокационных измерений и выделение характерных изменений траектории движения судна [7, 8].

Выходы обеих нейросетевых ветвей поступают в блок адаптивного слияния (Adaptive Fusion Block), формирующий согласованную оценку координат судна.

АИС-ветвь: входной вектор $X_{AIS}(t) \rightarrow$ однослойная LSTM (64 нейрона, функция активации $\tanh$) $\rightarrow$ выходной прогноз координат АИС и скорости. РАДАР / САРП-ветвь: входной вектор $X_{RAD}(t) \rightarrow$ Conv1D (32 фильтра, ReLU) + GRU (64 нейрона, $\tanh$) $\rightarrow$ выходной прогноз координат РАДАР / САРП и скорости.

Обучение нейросетевой модели осуществлялось путем минимизации функции потерь, определяемой как среднее квадратичное отклонение прогнозируемого значения от следующего измерения соответствующего источника [5]:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \|\hat{P}(t) - P_{ref}(t)\|_2^2, \quad (5)$$

где $\hat{P}(t)$ — прогнозируемое положение судна и скорость на момент времени t ;

$P_{ref}(t)$ — опорное значение (координата АИС или РАДАР / САРП и скорость на следующем шаге), используемое для обучения соответствующей нейросетевой ветви.

Следует отметить, что обучение отдельных ветвей модели выполнялось по собственным целевым последовательностям: для АИС-ветви (LSTM) целевыми значениями являлись параметры АИС, для РАДАР/САРП-ветви (Conv1D + GRU) — параметры РАДАР / САРП. При этом $P_{ref}(t)$ представляет собой следующее измерение соответствующего источника, используемое исключительно для обучения нейросетевых ветвей.

Формирование согласованной координаты судна выполнялось на основе адаптивного перераспределения доверительных коэффициентов источников [6]:

$$\alpha_i(t) = \frac{e^{-\sigma_i^2(t)}}{e^{-\sigma_{AIS}^2(t)} + e^{-\sigma_{RADAR}^2(t)}}, \quad i \in \{\text{АИС, РАДАР/САРП}\}, \quad (6)$$

где для расчета коэффициентов доверия $\alpha_i(t)$ используется дисперсия ошибок реконструкции $e_i(t)$, вычисляемая по скользящему временному окну длиной L согласно формуле (12).

Блок адаптивного слияния (fusion-блок) не содержит обучаемых параметров и реализует детерминированное взвешивание по формуле (6) на основе дисперсии ошибок реконструкции, вычисляемой каждой ветвью независимо.

После нормализации (формула (1)) для каждого источника формируется вектор текущих нормализованных параметров:

$$\begin{aligned} X_{AIS}(t) &= (\text{LAT}_{AIS}(t), \text{LON}_{AIS}(t), V_{AIS}(t)); \\ X_{RAD}(t) &= (\text{LAT}_{RAD}(t), \text{LON}_{RAD}(t), V_{RAD}(t)). \end{aligned} \quad (7)$$

На основе последовательности длиной p (скользящее окно) каждая нейросетевая ветвь формирует прогноз (восстановление) собственных входных данных:

$$\begin{aligned} \hat{X}_{AIS}(t) &= (\widehat{\text{LAT}}_{AIS}(t), \widehat{\text{LON}}_{AIS}(t), \hat{V}_{AIS}(t)); \\ \hat{X}_{RAD}(t) &= (\widehat{\text{LAT}}_{RAD}(t), \widehat{\text{LON}}_{RAD}(t), \hat{V}_{RAD}(t)). \end{aligned} \quad (8)$$

Ошибка реконструкции определяется как разность между фактическим и восстановленным вектором:

$$e_{AIS}(t) = X_{AIS}(t) - \hat{X}_{AIS}(t), \quad e_{RAD}(t) = X_{RAD}(t) - \hat{X}_{RAD}(t). \quad (9)$$

Для перехода от векторной ошибки к скалярной величине используется квадратичная форма:

$$\begin{aligned} E_{AIS}(t) &= (\Delta \text{LAT}_{AIS}(t))^2 + (\Delta \text{LON}_{AIS}(t))^2 + (\Delta V_{AIS}(t))^2; \\ E_{RAD}(t) &= (\Delta \text{LAT}_{RAD}(t))^2 + (\Delta \text{LON}_{RAD}(t))^2 + (\Delta V_{RAD}(t))^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Далее значения $E_i(t)$ накапливаются в скользящем временном окне длиной L :

$$\{E_i(t-L+1), \dots, E_i(t)\}. \quad (11)$$

где L — длина скользящего временного окна.

В работе использовалось $L = 7$. Следует отметить, что на тестовом интервале длиной 7 с дисперсия вычисляется лишь к моменту $t = 7$, что соответствует однократному вычислению коэффициентов доверия.

По накопленному набору значений вычисляется дисперсия скалярной ошибки реконструкции:

$$\sigma_i(t)^2 = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} (E_i(t-j) - E)^2. \quad (12)$$

Таким образом, величина $e_i(t)$ является дисперсией скалярных ошибок реконструкции источника в скользящем окне длиной L [8]. В отличие от энтропии, дисперсия учитывает не только характер распределения ошибок, но и их масштаб: малые по амплитуде флуктуации дают малую дисперсию даже при равномерном распределении. Значение подставляется в формулу (6) для вычисления коэффициентов доверия $\alpha_i(t)$. При росте дисперсии ошибок реконструкции (увеличении нестабильности источника) вес источника уменьшается.

Дисперсия $\sigma_i^2(t)$ вычисляется исключительно по ошибкам реконструкции соответствующего источника, не требуя использования опорных траекторий или знания истинного положения судна. Для каждого канала нейросетевая ветвь формирует прогноз собственных навигационных параметров, после чего определяется ошибка реконструкции. По значениям скалярной ошибки, накопленным в скользящем временном окне длиной L , рассчитывается дисперсия ошибок реконструкции, характеризующая амплитуду и разброс флуктуаций.

В рамках рассматриваемого тестового фрагмента длительностью 7 с дисперсия может быть определена лишь к последнему моменту доступного окна. Следовательно, на независимых тестовых данных адаптивное перераспределение коэффициентов доверия проявляется однократно, что обусловлено ограниченной длиной временного интервала.

Итоговая интегрированная координата судна вычислялась в виде взвешенной комбинации координат источников:

$$\text{LAT}_F(t+1), \text{LON}_F(t+1). \quad (13)$$

Выход модели представляет собой интегрированную координату судна, формируемую в результате адаптивного взвешивания данных АИС и РАДАР / САРП.

При обучении нейросетевых ветвей в качестве целевых значений используются координаты и скорости соответствующего источника на следующем шаге: для LSTM-ветви — данные АИС, для Conv1D+GRU-ветви — данные РАДАР / САРП. Таким образом, каждая нейросетевая ветвь обучается прогнозировать следующее значение собственного источника, не используя данные другого.

Рекуррентная нейросетевая модель АИС-ветви реализована в виде однослойной LSTM-сети с размерностью скрытого состояния 64 нейрона. Сверточно-рекуррентная модель РАДАР / САРП-ветви включает один сверточный слой Conv1D с 32 фильтрами и рекуррентный слой GRU с размерностью скрытого состояния 64 нейрона.

Выбор указанных архитектурных параметров осуществлялся эмпирически на основе анализа сходимости функции потерь на обучающей и валидационной выборках. Увеличение размерности скрытого состояния не приводило к существенному улучшению точности, но увеличивало вычислительную сложность модели.

Таким образом, выбранная конфигурация обеспечивает компромисс между точностью согласования навигационных данных и вычислительной эффективностью модели.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Модель реализована в среде PyTorch 2.2 (Python 3.10) на рабочей станции с GPU NVIDIA RTX 3090 (10 GB), процессором Intel i9-10900K и 32 GB RAM под управлением Ubuntu 22.04. В результате обработки логов АИС и РАДАР / САРП построены два независимых трека движения судна-цели *PALU LNG*. После синхронизации временных меток и перевода координат в десятичные градусы выполнен анализ пространственных и временных расхождений между системами. Среднее пространственное смещение между координатами АИС и РАДАР / САРП составило:

$$\bar{d} = 700,4 \text{ м}, \sigma_d = 48,7 \text{ м}, \quad (14)$$

где $\bar{d}$ — среднее значение отклонения;
 σ_d — стандартное отклонение.

Для анализа работоспособности предложенной нейросетевой архитектуры рассмотрен процесс обучения модели, а также однократное вычисление доверительных коэффициентов на тестовом фрагменте данных.

На этапе обучения каждая нейросетевая ветвь минимизировала функцию потерь (MSE) относительно следующего значения собственного источника данных: LSTM-ветвь обучалась на данных АИС, Conv1D + GRU-ветвь — на данных РАДАР / САРП. Для оценки устойчивости процесса обучения построен график изменения значения функции потерь (MSE) в зависимости от номера эпохи (рис. 2).

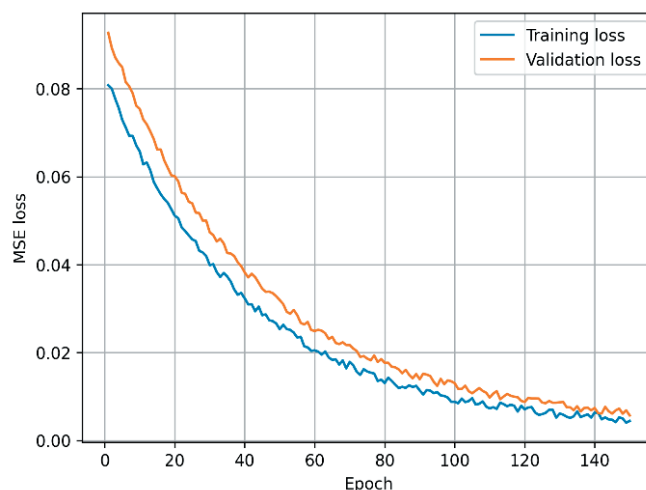


Рис. 2. Изменение значения функции потерь (MSE) в процессе обучения нейросетевой модели (на примере LSTM-ветви АИС, переменная LAT)

Fig. 2. Change in the Loss Function (MSE) during Neural Network Model Training (AIS LSTM Branch, LAT Variable)

Тестовый фрагмент данных длиной семь моментов времени использовался для проверки прогностической способности нейросетевых ветвей и демонстрации механизма адаптивного формирования коэффициентов доверия. Следует отметить, что при длине скользящего окна дисперсии $L = 7$ корректное вычисление коэффициентов перераспределения весов на независимых данных возможно только к последнему моменту тестового интервала. В связи с этим результаты носят демонстрационный характер.

Как видно из графика, наблюдается устойчивая сходимость функции потерь на обучающей и валидационной выборках. Кривые имеют согласованный характер и не демонстрируют признаков переобучения в пределах выбранного числа эпох, что подтверждает корректность обучения архитектуры на имеющемся наборе данных. Таким образом, на рассмотренном экспериментальном фрагменте продемонстрирован механизм адаптивного формирования коэффициентов доверия на основе статистики ошибок реконструкции без использования фиксированных априорных весов.

Следует отметить, что в силу ограниченной длины тестового интервала настоящая работа не претендует на статистически значимое исследование. Представленные результаты иллюстрируют принцип предложенной архитектуры для слияния навигационных данных. Оценка вычислительной сложности показала возможность выполнения алгоритма в режиме, близком к реальному времени (среднее время обработки порядка 25 мс на шаг) на вычислительной платформе уровня RTX 3090.

Предложенная архитектура может рассматриваться как механизм формирования адаптивных коэффициентов доверия при интеграции данных разнородных навигационных источников. Расширенная статистическая проверка устойчивости и сравнение с альтернативными алгоритмами требуют увеличения объема независимых данных и рассматриваются как направление дальнейших исследований. Результаты согласуются с опубликованными подходами к адаптивному слиянию данных разнородных навигационных источников [3, 7].

Заключение (Conclusion)

В ходе исследования навигационных данных АИС и РАДАР / САРП, полученных в рейсе судна BRATSK при наблюдении судна-цели PALU LNG, на основе синхронизации логов были построены независимые траектории движения и выявлены пространственные и временные расхождения между источниками информации. Показано, что среднее пространственное смещение

координат составляет порядка 700 м, что подтверждает ограниченность прямого сопоставления данных и обосновывает необходимость применения методов согласования навигационных измерений.

В работе проведен эксперимент по обучению и проверке работоспособности нейросетевой модели адаптивного слияния данных, использующей отдельную обработку информации АИС и РАДАР / САРП с последующим объединением на основе адаптивного формирования коэффициентов доверия. Результаты продемонстрировали корректность функционирования архитектуры и возможность формирования согласованной траектории на основе анализа ошибок реконструкции временных последовательностей.

Следует отметить, что эксперимент выполнен на одном синхронизированном фрагменте данных длительностью 86 с. Полученные результаты носят демонстрационный характер и демонстрируют принцип работы предложенной архитектуры. Для статистически устойчивой проверки механизма дисперсионной адаптации и оценки переносимости подхода требуется более протяженный независимый интервал наблюдений.

Предложенная архитектура реализует механизм динамического перераспределения доверия между навигационными каналами на основе оценки текущей неопределенности источников. Это обеспечивает изменение вклада каналов в итоговую оценку координат без использования фиксированных априорных весов.

Модель учитывает временную динамику навигационных данных и реагирует на изменение статистики ошибок измерений. Кроме того, в рамках рассматриваемой постановки модель не использует априорную информацию о типе судна или районе плавания, оперируя нормализованными временными рядами навигационных параметров и анализируя относительную динамику и статистику ошибок реконструкции [9]. Вместе с тем выводы о переносимости и универсальности подхода требуют проверки с использованием более протяженных и разнообразных экспериментальных данных.

В структуре модели механизм выявления нестабильности навигационных данных реализован в рамках блока адаптивного слияния. Тем самым функциональность системы расширяется от согласования координат к задаче мониторинга качества навигационной информации.

Алгоритм реализуем в режиме, близком к реальному времени (среднее время обработки порядка 25 мс на шаг интеграции) на вычислительной платформе уровня RTX 3090. Оценка его эксплуатационных характеристик в реальных навигационных условиях требует дальнейших исследований. В частности, предполагается расширение экспериментальной базы для проверки устойчивости модели в различных условиях эксплуатации, а также разработка методов интерпретации результатов работы модели [10] и интеграция подхода в комплексные системы мониторинга.

Таким образом, результаты проведенного исследования демонстрируют работоспособность предложенного нейросетевого механизма адаптивного слияния данных АИС и РАДАР / САРП в рамках рассмотренного экспериментального сценария и подтверждают перспективность дальнейшего развития данного направления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alamouh A. S.* Maritime Autonomous Surface Ships: Architecture for Autonomous Navigation Systems / A. S. Alamouh, A. I. Ölçer // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2025. — Vol. 13. — Art. 122. — EDN UZUUYQ. — DOI: 10.3390/jmse13010122.
2. Association of AIS and Radar Data in Intelligent Navigation in Inland Waterways Based on Trajectory Characteristics / J. Lei, Y. Sun, Y. Wu [et al] // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2024. — Vol. 12. — Art. 890. — EDN MDJESY. — DOI: 10.3390/jmse12060890.
3. *Habtemariam B.* Measurement-Level AIS/Radar Fusion for Maritime Surveillance [Электронный ресурс] / B. Habtemariam, R. Tharmarasa, T. Kirubarajan. — 2012. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/258716359> (дата обращения: 01.02.2026). — DOI: 10.1117/12.920156.

4. Anomaly Detection in Maritime AIS Tracks: A Review of Recent Approaches / K. Wolsing, L. Roepert, J. Bauer, K. Wehrle // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2022. — Vol. 10. — Art. 112. — EDN TYTKMJ. — DOI: 10.3390/jmse10010112.

5. Дерябин В. В. Оценка быстродействия нейросетевого алгоритма определения широты судна по глубине / В. В. Дерябин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 26–37. — EDN LEGQTV. — DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-26-37.

6. Zhang R. Edge-Based Dynamic Spatiotemporal Data Fusion on Smart Buoys for Intelligent Surveillance of Inland Waterways / R. Zhang, C. Zhao, Y. Liang // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2025. — Vol. 13. — Art. 220. — EDN VWYJWR. — DOI: 10.3390/jmse13020220.

7. Patrick U. Radar-Based Target Tracking Using Deep Learning Approaches with Unscented Kalman Filter / U. Patrick, B. O. L. Jagan, H. M. Rai [et al] // *Applied Sciences*. — 2024. — Vol. 14. — Art. 8332. — EDN BIDNTP. — DOI: 10.3390/app14188332.

8. Дерябин В. В. Определение местоположения судна по рельефу дна при помощи нейронной сети / В. В. Дерябин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 172–179. — EDN ZCDZNR. — DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-172-179.

9. Resilient Multi-Sensor UAV Navigation with a Hybrid Federated Fusion Architecture / S. A. Negru, P. Geragersian, I. W. Petrunin, Guo [et al] // *Sensors*. — 2024. — Vol. 24. — Art. 981. — EDN OLEOCI. — DOI: 10.3390/s24030981.

10. Veitch E. Human-Centered Explainable Artificial Intelligence for Marine Autonomous Surface Vehicles / E. Veitch, O. A. Alsos // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2021. — Vol. 9. — Art. 1227. — EDN MNMIND. — DOI: 10.3390/jmse9111227.

REFERENCES

1. Alamoush, A. S. and A. I. Ölçer. "Maritime Autonomous Surface Ships: Architecture for Autonomous Navigation Systems." *Journal of Marine Science and Engineering* 13.1 (2025). DOI: 10.3390/jmse13010122.

2. Lei, J., X. Liu et al. "Association of AIS and Radar Data in Intelligent Navigation in Inland Waterways Based on Trajectory Characteristics." *Journal of Marine Science and Engineering* 12.6 (2024). DOI: 10.3390/jmse12060890.

3. Habtemariam, B. K., R. Tharmarasa, E. Meger and T. Kirubarajan. "Measurement level AIS/radar fusion for maritime surveillance." *Signal and Data Processing of Small Targets 2012 – 8393*. SPIE, 2012: 83930I. DOI: 10.1117/12.920156.

4. Wolsing, K., L. Roepert, J. Bauer and K. Wehrle. "Anomaly Detection in Maritime AIS Tracks: A Review of Recent Approaches." *Journal of Marine Science and Engineering* 10.1 (2022). DOI: 10.3390/jmse10010112.

5. Deryabin, V. V. "Assessment of calculation performance of a neural network-based algorithm for bathymetric prediction of vessel latitude." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.1 (2026): 26–37. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-26-37.

6. Zhang, R., M. Pan et al. "Edge-Based Dynamic Spatiotemporal Data Fusion on Smart Buoys for Intelligent Surveillance of Inland Waterways." *Journal of Marine Science and Engineering* 13.2 (2025). DOI: 10.3390/jmse13020220.

7. Patrick, U., W. Pak et al. "Radar-Based Target Tracking Using Deep Learning Approaches with Unscented Kalman Filter." *Applied Sciences* 14.18 (2024). DOI: 10.3390/app14188332.

8. Deryabin, V. V. "Seabed relief-based vessel position fixing with a neural network." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 172–179. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-172-179.

9. Negru, S. A., P. Geragersian, I. Petrunin and W. Guo. "Resilient Multi-Sensor UAV Navigation with a Hybrid Federated Fusion Architecture." *Sensors* 24.3 (2024). DOI: 10.3390/s24030981.

10. Veitch, E. and O. A. Alsos. "Human-Centered Explainable Artificial Intelligence for Marine Autonomous Surface Vehicles." *Journal of Marine Science and Engineering* 9.11 (2021). DOI: 10.3390/jmse9111227.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ермаков Никита Дмитриевич —
аспирант
ФГБОУ ВО «Государственный
морской университет имени адмирала
Ф. Ф. Ушакова»
353922, Российская Федерация,
г. Новороссийск, пр. Ленина, 93
e-mail: ermakovnd@icloud.com

Астрейн Вадим Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Государственный морской
университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»
353922, Российская Федерация,
г. Новороссийск, пр. Ленина, 93
e-mail: astrein-vadim@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ermakov, Nikita D. —
Postgraduate Student,
Admiral Ushakov
Maritime State University
93 Lenin Avenue, Novorossiysk,
353922, Russian Federation
e-mail: ermakovnd@icloud.com

Astrein, Vadim V. —
Doctor of Technical Sciences, Professor
Ushakov Maritime
State University
93 Lenin Avenue, Novorossiysk,
353922, Russian Federation
e-mail: astrein-vadim@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2026 г.

Received: Apr. 20, 2026.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ СУДНА С АКТИВНЫМИ СРЕДСТВАМИ УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКИМ АЛГОРИТМОМ

И. А. Мажирин

ДВФ ФАУ «Российский Морской Регистр Судоходства»,
Владивосток, Российская Федерация

В статье представлен способ первичной идентификации параметров упрощенной математической модели движения судна с активными средствами управления и дальнейшая адаптация параметров модели под новые условия. В качестве математической модели движения судна с активными средствами управления выбрана модель на основе стандарта IEC62065. Необходимость автоматизации идентификации параметров математической модели обусловлена трудоемкостью поиска гидродинамических и аэродинамических характеристик для адекватной симуляции движения судна, а также тем, что судно является динамическим объектом, у которого могут меняться навигационные качества в зависимости от крена, дифферента, обрастаемости корпуса и т. д. Дано краткое обоснование существующих проблем при создании математических моделей движения судна и последующей идентификации ее параметров. Разъяснение принципа работы генетического алгоритма выполнено так, чтобы ознакомить с данным подходом, не отвлекая от основной цели работы. При моделировании движения судна для экспериментов выбраны два маневра, позволяющих определять маневренные характеристики судна: «Циркуляция» и «Зиг-заг». При проведении эксперимента с выполнением маневра «Циркуляция» выполнено сравнение параметров технической документации судна, составленной по результатам ходовых испытаний, с результатами моделирования математической модели при идентификации параметров ручным подбором и посредством генетического алгоритма. Задачей исследования являлось проведение идентификации параметров модели, настройка параметров работы генетического алгоритма применительно к поставленной задаче и повышение точности моделирования движения. При проведении эксперимента с выполнением маневра «Зиг-заг» имитировано изменение параметров математической модели движения судна в определенный момент времени. В качестве эталонных динамических параметров судна использован созданный на базе математической модели «Наблюдатель», представляющий собой в реальном случае комплекс измерительных систем на судне. Задача предлагаемого генетического алгоритма — перенастроить модель так, чтобы разница между динамическими параметрами движения судна и рассчитываемой математической моделью была минимальной.

Ключевые слова: генетический алгоритм, искусственный интеллект, идентификация параметров, математическая модель судна, движительно-рулевой комплекс, система автоматического управления, активные средства управления, траектория судна, гидродинамические характеристики, управление по эталонной модели.

Для цитирования:

Мажирин, И. А. Идентификация параметров математической модели движения судна с активными средствами управления генетическим алгоритмом / И. А. Мажирин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 4. С. 625–637. EDN NPWWQC. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-625-637.

IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF A MATHEMATICAL MODEL OF SHIP MOTION WITH ACTIVE CONTROL DEVICES USING A GENETIC ALGORITHM

I. A. Mazhirin

FEB FAI "Russian Maritime Register of Shipping,"
Vladivostok, Russian Federation

The article presents a method for the initial identification of parameters of a simplified mathematical model of ship motion with active control devices and the subsequent adaptation of the model parameters to changing

conditions. A model based on the IEC 62065 standard is used as the mathematical model of ship motion with active control devices. The need to automate model parameter identification is determined by the labour-intensive process of determining hydrodynamic and aerodynamic characteristics required for adequate simulation of ship motion, as well as by the fact that a ship is a dynamic object whose motion characteristics may change depending on heel, trim, hull fouling, and other factors. The article briefly discusses existing problems associated with developing mathematical models of ship motion and identifying their parameters. The operating principle of the genetic algorithm is explained to provide an understanding of the approach without distracting from the main objective of the study. Two standard manoeuvres used to determine ship manoeuvring characteristics, the Turning Circle and Zig-Zag manoeuvres, were selected for the experiments. In the Turning Circle experiment, parameters obtained from the ship's technical documentation based on sea trials were compared with simulation results obtained after manual parameter tuning and parameter identification using a genetic algorithm. The experiment was aimed at identifying the model parameters, adjusting the genetic algorithm settings to the task, and improving simulation accuracy. In the Zig-Zag experiment, a change in the parameters of the mathematical model of ship motion was simulated at a specified point in time. An Observer developed on the basis of the mathematical model was used to provide reference dynamic parameters of the ship; in actual operation, it represents a set of onboard measuring systems. The genetic algorithm is intended to retune the model so as to minimize the difference between the dynamic parameters of ship motion and those calculated by the mathematical model.

Keywords: genetic algorithm, artificial intelligence, parameter identification, mathematical model of ship motion, propulsion and steering system, automatic control system, active control devices, ship trajectory, hydrodynamic characteristics, model reference control.

For citation:

Mazhirin, Ilia A. " Identification of parameters of a mathematical model of ship motion with active control devices using a genetic algorithm ." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.4 (2026): 625–637. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-625-637.

Введение (Introduction)

Математическая модель движения судна (ММДС) является необходимым элементом средств автоматизации судовождения. С ее помощью можно получить предсказание поведения моделируемого объекта в определенных временных рамках. Благодаря предсказанию появляется возможность включить в алгоритмы автоматизированного управления упреждающее воздействие на внешние возмущения, а также смоделировать траекторию движения. В общем случае в ММДС включены параметры гидродинамических и аэродинамических характеристик судна.

Поиск данных параметров является трудоемким и времязатратным процессом, а в некоторых случаях и труднодостижимым ввиду изменения вида конструкций корпусов и движительно-рулевого корпуса современных судов, так как большинство изданий, в которых приведено описание характеристик корпусов и ДРК судов (например, Войткунский Я. И. Справочник по теории корабля. — Л.: Судостроение, 1984. — 542 с., Гофман А. Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна. — Л.: Судостроение, 1988. — 360 с. и др.), были написаны в XX в., поэтому теоретические чертежи корпусов судна, номограммы и расчетные графики не всегда позволяют выбрать оптимальные коэффициенты.

Для упрощения процесса моделирования движения современных судов и разработки алгоритмов автоматизированного управления такими судами в научно-техническом сборнике [1] был представлен способ получения ММДС без использования прямых расчетов аэродинамических и гидродинамических характеристик судна. Однако данная модель также имеет параметры, которые необходимо идентифицировать для точной симуляции движения.

Возможность применения генетического алгоритма (ГА) с целью идентификации параметров выбранной модели является целью рассмотрения в данной статье. Помимо ГА, существует множество методов поиска параметров настройки математической модели объекта управления. В зависимости от задачи возможный конечный результат поиска может отличаться в лучшую или худшую сторону. В случае, когда параметры выбранной ММДС можно получить, опираясь на эмпирические значения, поиск сводится к перебору значений. Ввиду того, что выбранная модель настраивается по графику маневра «Циркуляция», поиск параметров

будет осуществляться также перебором. В качестве подходящих методов поиска можно выделить следующие:

1. Ручной подбор.
2. Метод прямого покоординатного спуска.
3. Посредством технологий искусственного интеллекта.

Ручной подбор из всех ранее указанных является самым трудоемким и не дает гарантий, что сможет привести к требуемому результату.

Главным недостатком методов прямого поиска является то, что при неверных настройках алгоритм приводит к локальному минимуму. Данное обстоятельство напрямую зависит от выбранных параметров поиска, начальной точки поиска, а также функции ошибки, по которой идет оптимизация параметров модели. Сравнительные экспериментальные исследования показывают, что генетические алгоритмы, как правило, превосходят градиентные методы при идентификации параметров линейных и нелинейных моделей судов, поскольку последние чаще сходятся к локальным минимумам [2].

Технологиями искусственного интеллекта являются нейронные сети, нечеткая логика, экспертные системы и генетический алгоритм. Согласно исследованиям [3–5], наилучшие результаты поиска глобального минимума были получены с помощью использования генетического алгоритма (ГА). Современные исследования подтверждают высокую эффективность ГА именно для настройки коэффициентов моделей судов по данным ходовых испытаний и моделирования: алгоритм позволяет существенно повысить точность прогнозирования и устранить осцилляции при валидации [6, 7].

Методы и результаты (Methods and Results)

Описание алгоритма. Генетический алгоритм — это адаптивный метод поиска, используемый для решения задач оптимизации с использованием механизма генетического наследования и естественного отбора [3, 8, 9]. При оперировании ГА сохраняется биологическая терминология в упрощенном виде и основные понятия линейной алгебры.

Для четкого понимания действия алгоритма необходимо ввести пояснения к терминологии.

Вектор — упорядоченный набор чисел, называемых *компонентами вектора*¹. Так как вектор можно представить в виде строки его координат, то в дальнейшем понятия *вектора* и *строки* считаются идентичными.

Хромосома — вектор (или строка) из каких-либо чисел. Если этот вектор представлен бинарной строкой из нулей и единиц, например, 1010011, то он получен либо с использованием двоичного кодирования либо кода Грея. Каждая позиция (бит) хромосомы называется геном.

Индивидуум (генетический код, особь) — набор хромосом (вариант решения задачи).

Кроссинговер (*кроссовер*) — операция, при которой две хромосомы обмениваются своими частями. Например, 1100&1010 → 1110&1000.

Мутация — случайное изменение одной или нескольких позиций в хромосоме. Например, 1010011 → 1010001.

Инверсия — изменение порядка следования битов в хромосоме или в ее фрагменте. Например, 1100 → 0011.

Популяция — совокупность индивидуумов.

Пригодность (*приспособленность*) — критерий или функция, экстремум которой следует найти. Основные принципы работы ГА представлены на рис. 1 в виде следующих этапов [9]:

1-й этап — генерируется начальная популяция из n -хромосом;

2-й этап — вычисляется пригодность для каждой хромосомы;

3-й этап — выбирается пара хромосом-родителей с помощью одного из способов отбора;

4-й этап — проводится кроссинговер двух родителей с вероятностью p_c , производящий двух потомков;

¹ Данное определение вектора отличается от определения, принятого в математике.

- 5-й этап — проводится мутация потомков с вероятностью p_m ;
6-й этап — повторяются 3-й – 5-й этапы, пока не будет сгенерировано новое поколение популяции, содержащее n хромосом;
7-й этап — повторяются 2-й – 6-й этапы, пока не будет достигнут критерий окончания процесса.

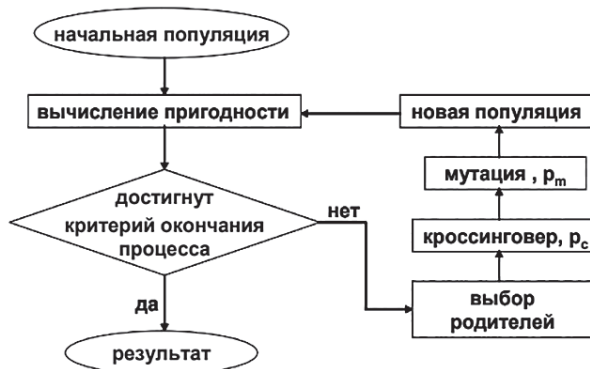


Рис. 1. Блок-схема работы генетического алгоритма
Fig. 1. Flowchart of the Genetic Algorithm

Критерием окончания поиска является заданное количество поколений, удовлетворяющий результат поиска или схождение популяции. Под *схождением популяции* подразумевается, что все строки популяции почти одинаковы и находятся в области определенного экстремума.

Формирование ГА под задачу идентификации. Для идентификации выбранной ММДС [1] необходимо подобрать три параметра: τ_u , τ_v , τ_r . Значения данных параметров будут являться набором из трех хромосом для выбранной особи.

Согласно блок-схеме, представленной на рис. 1, начало работы с ГА происходит с формирования первой популяции. Размер популяции будет влиять на количество различных комбинаций хромосом, и следовательно, повышать качество поиска, одновременно увеличивая расчётную нагрузку на ЭВМ. Первая популяция создается случайным образом:

$$T_1 = \tau_{i_{\max}} \cdot \text{rand}(). \quad (1)$$

Здесь T_1 — матрица параметров τ первой популяции размерами $p \times i$, где индекс p равен размеру популяции;

$\tau_{i_{\max}}$ — верхний предел поиска параметра τ_i ;

$\text{rand}()$ — генератор случайных чисел от 0 до 1 (в данной записи на языке MATLAB с распределением Гаусса).

По окончании формирования популяции имеем матрицу T_1 следующего вида:

$$T_1 = \begin{bmatrix} \tau_{1u} & \tau_{1v} & \tau_{1r} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \tau_{pu} & \tau_{pv} & \tau_{pr} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Далее необходимо проверить популяцию на приспособленность. Для этого параметры матрицы T_1 построчно просчитываются в так называемой фитнес-функции F_p (функция выживаемости). В качестве фитнес функции на данном этапе будем использовать симуляцию циркуляции судна. На вход функция принимает параметры настройки ММДС и выдает суммарную средневзвешенную ошибку по параметрам сравнения смоделированной циркуляцией и графиком из ходовых испытаний. Математически можно записать в виде следующей формулы:

$$F_p(\tau_{pu}, \tau_{pv}, \tau_{pr}) = \Delta_{\Sigma}. \quad (3)$$

Далее задача ГА состоит в том, чтобы минимизировать выходное значение функции методом подбора параметров.

Вычисления ГА в классической форме предполагают работу с двоичными числами. Для оперирования параметрами идентификации ММДС и расчета хромосом в двоичной форме используется следующая формула:

$$\tau_i = \frac{\tau_{i\max} G_i}{2^n}, \quad (4)$$

где i — индекс параметра τ ;

$\tau_{i\max}$ — верхний предел поиска параметра τ_i ;

G_i — значение хромосомы i -го параметра в десятичной форме;

n — разрядность формирования хромосомы.

Следует отметить, что точность нахождения параметра будет зависеть напрямую от значения n . В случае, если первая популяция не удовлетворила критерию окончания поиска, формируются пары родителей для скрещивания и получения потомства (кроссинговер). Выбор родителей может производиться различными методами, имеющими стохастическую основу. Наиболее популярным является *метод рулетки*, приведенной в указанной последовательности:

1. Для каждой особи популяции рассчитывается обратное значение фитнес функции $\frac{1}{F_p}$.

2. Рассчитывается сумма всех обратных значений $\Phi_\Sigma = \sum_1^p \frac{1}{F_p}$.

3. В пространстве вектора $[0, 1]$ или $[0, 100]$ (в зависимости от масштабирования) для каждой

особи откладывается отрезок длиной, равной $\Phi = \frac{\frac{1}{F_p}}{\Phi_\Sigma}$.

3. Путем выбора отрезков случайным способом отбирается необходимое количество родителей.

Суть такого подхода заключается в том, что отрезки, у которых значение фитнес-функции меньше, будут длиннее. Следовательно, вероятность попадания случайным способом в такой отрезок больше.

Для начала кроссинговера пар предварительно хромосомы переводятся в двоичную форму G_i^n , где n — разрядность двоичного числа. Далее случайным способом формируются пары. Для каждой пары также случайным способом от 1 до n выбирается точка кроссинговера, хромосомы обмениваются «хвостами» и на выходе получаются два потомка. Схема одноточечного кроссинговера представлена на рис. 2.

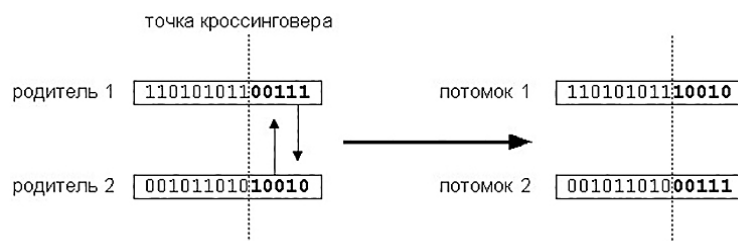


Рис. 2. Механизм осуществления одноточечного кроссинговера
Fig. 2. One-Point Crossover Scheme

Далее подход может включать обязательную мутацию или возможность приступить к ней только в случае вырождения популяции. Под мутацией понимают инверсию гена (бита) с 0 на 1 или наоборот. В наиболее простом случае для настройки операции мутации выбирается ее интенсивность

(количество генов в хромосоме подверженных мутации) и вероятность мутации. На практике это происходит следующим образом:

1. На выбранной хромосоме случайным образом выбирается количество битов, подверженных мутации согласно выбранной интенсивности;
2. По генам, попавшим под мутацию, рассчитывается вероятность мутации и в случае, если она удовлетворена, то ген инвертируется. Схема механизма осуществления мутации представлена на рис. 3.

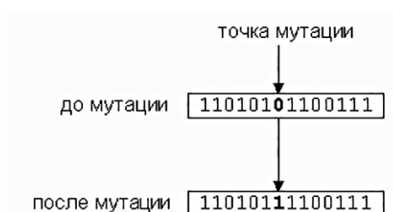


Рис. 3. Механизм осуществления мутации

Затем хромосомы из двоичной формы переводятся в десятичную, и осуществляется расчет новой матрицы параметров T_2 по формуле (4), формируя следующее поколение. Цикл повторяется вновь до тех пор, пока не будут выполнены критерии остановки.

Проведение испытаний ГА для идентификации ММДС по маневру «Циркуляция». Для определения качества первичной идентификации сравнение будем проводить с результатами ручного подбора параметров [1]. Результаты ручного подбора параметров ММДС представлены в табл. 1.

Аналогичный подход — идентификация и тонкая настройка параметров модели маневрирования судна по данным маневра «Циркуляция» (Turning Circle) с помощью генетического алгоритма — продемонстрировал высокую эффективность на судах [7].

Таблица 1

Результаты ручного подбора параметров выбранной модели

Table 1

Results of Manual Parameter Tuning for the Selected Model

Погрешность	τ_u , с	τ_v , с	τ_r , с	γ , о. е.	Δ_S , %	Δ_U , %	Δ_T , %
	121	7,8	0,17	0	20,4	6,91	6,59
	Диаметр, м	Выдвиг, м		Смещение, м			
	154	185		62,3			
δ , %	10,8	26,5		24			
	u_{90} , уз	u_{270} , уз.	t_{90} , с	t_{270} , с	Δ_Σ , %		
	8,61	2,34	25,9	76,7	11,3		
δ , %	12,2	1,65	3,6	9,57			

Примечания: u_{90} , u_{270} — значения параметров продольной скорости в момент разворота судна на 90 и 270°; t_{90} , t_{270} — время, затраченное судном для разворота на 90 и 270°; δ — относительная погрешность по выбранному параметру; Δ_S , Δ_U , Δ_T — среднестатистическая погрешность по расстоянию, скорости, времени соответственно; Δ_Σ — среднестатистическая погрешность по всем параметрам.

Выполним сравнение относительно средневзвешенной процентной ошибки Δ_{Σ} . При проведении идентификации ММДС посредством ГА необходимо определить входные параметры настройки алгоритма. Для полноценной работы определены следующие параметры:

- $\tau_{\max}$ — вектор строка верхнего предела поиска параметров настройки с размерностью $1 \times i$, где i — количество настраиваемых параметров;
- n — разрядность разбиение генов на двоичное число;
- population — количество особей в популяции;
- generation — количество поколений;
- P_{mi} — вероятность мутации особи;
- P_{mg} — вероятность мутации гена;
- K_m — количество мутируемых генов в хромосоме.

Для всех испытаний зададим $\tau_{\max} = [300 \ 20 \ 10]$ и $n = 10$. Выбор верхней границы параметров объясняется примерными числами, полученными во время ручного подбора параметров ММДС, а разрядность выбирается исходя из того, какая точность искомого параметра необходима. Остальные выбранные параметры для проведения испытания алгоритма указаны на графиках.

Для иллюстрации алгоритма проведем несколько испытаний с различными количествами поколений популяций. На рис. 4 и 5 показаны графики фитнес-функций всех особей популяции, а также средние и минимальные значения фитнес-функций в поколении соответственно.

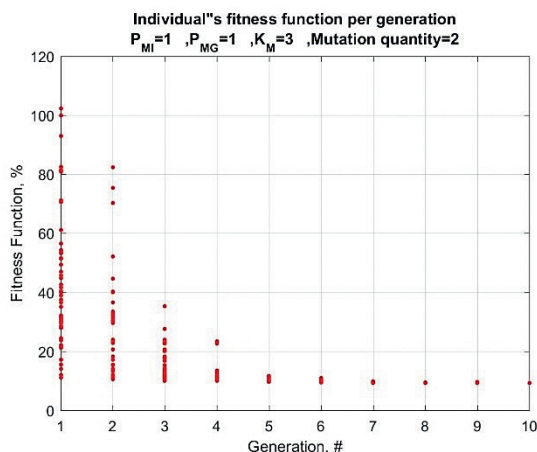


Рис. 4. График значений фитнес-функций всех особей в популяции на 10 поколений
Fig. 4. Fitness-Function Values for All Individuals in the Population over 10 Generations

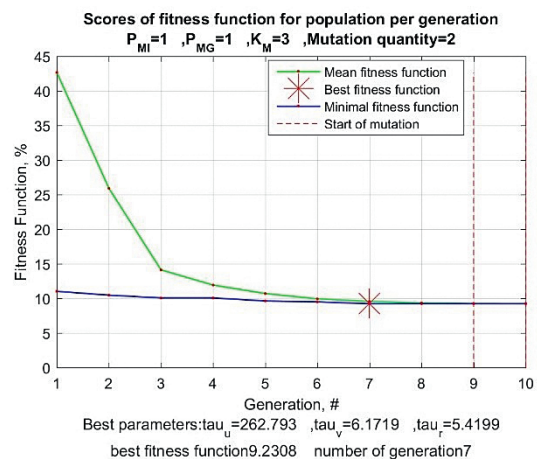


Рис. 5. График минимальных и средних значений фитнес-функций в поколении
Fig. 5. Minimum and Mean Fitness-Function Values per Generation

Из данных графиков видно, что уже к восьмому поколению популяция почти полностью выродилась, и на девятом и десятом поколении началась мутация, но оказать эффект она не успела. Из этого следует, что для полноценного раскрытия потенциала ГА необходимо задать достаточное количество поколений. На рис. 6 и 7 приведены результаты испытаний ГА на 30 поколений, на основе результатов которых можно сделать вывод о том, что были найдены параметры лучше, чем в ручном подборе, так как погрешность стала ниже. Также на графиках видно, как гены популяции вырождаются и происходит мутация, и кроме того видно как появляются особи, сильно выпадающие из общего тренда фитнес-функции. Такие особи отсекаются во время создания пар до кроссинговера.

На рис. 8 и 9 показаны результаты испытаний на 50 поколений при параметрах мутации $P_m = 1$, $P_{mg} = 1$, $K_m = 3$. Следует отметить, что после 10-го поколения мутация пошла не на пользу алгоритму поиска. При выбранных параметрах каждая особь подвержена мутации с вероятностью в 100 %, а каждые три случайно выбранных гена мутируют с вероятностью в 100 %. Полученные

результаты свидетельствуют о том, что интенсивность мутации слишком велика и полученные потомки перестают быть похожими на родителей, вследствие чего фитнес-функция популяций после 10-го поколения становится хуже предыдущих. Слишком слабая интенсивность, напротив, может не повлиять на поиск вовсе, и глобальный минимум так и не будет найден.

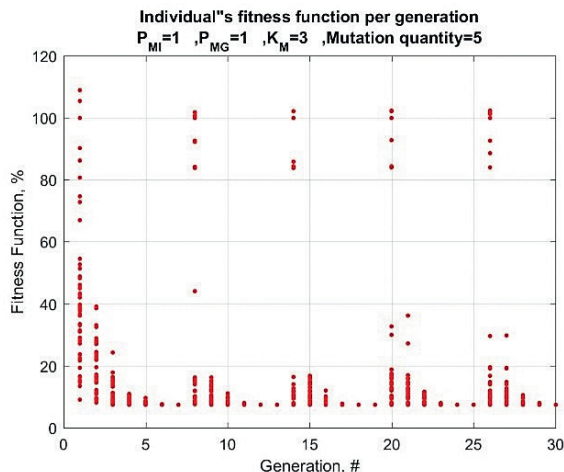


Рис. 6. График значений фитнес функций всех особей в популяции на 30 поколений
Fig. 6. Fitness-Function Values for All Individuals in the Population over 30 Generations

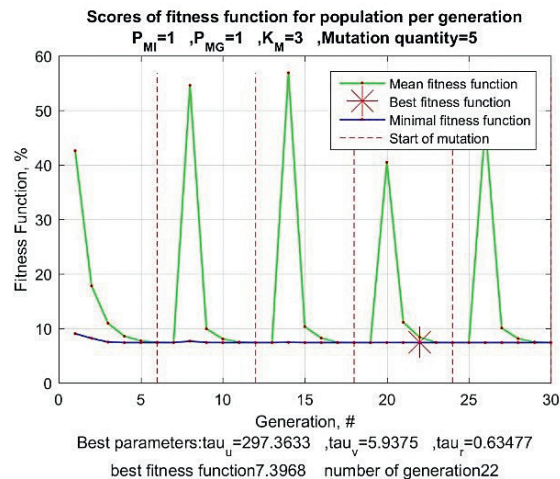


Рис. 7. График минимальных и средних значений фитнес-функции в поколении
Fig. 7. Minimum and Mean Fitness-Function Values per Generation

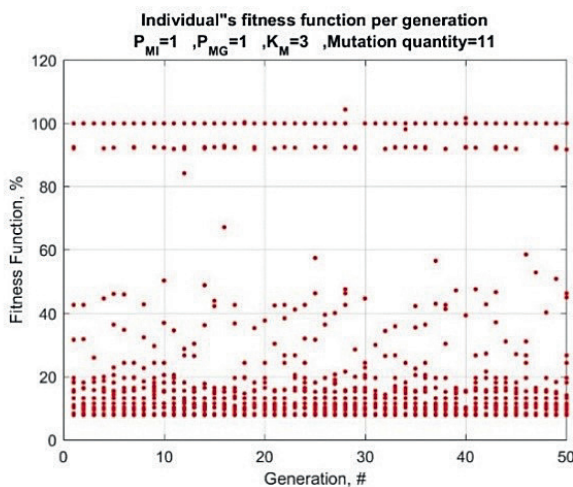


Рис. 8. График значений фитнес-функций всех особей в популяции на 50 поколений
Fig. 8. Fitness-Function Values for All Individuals in the Population over 50 Generations

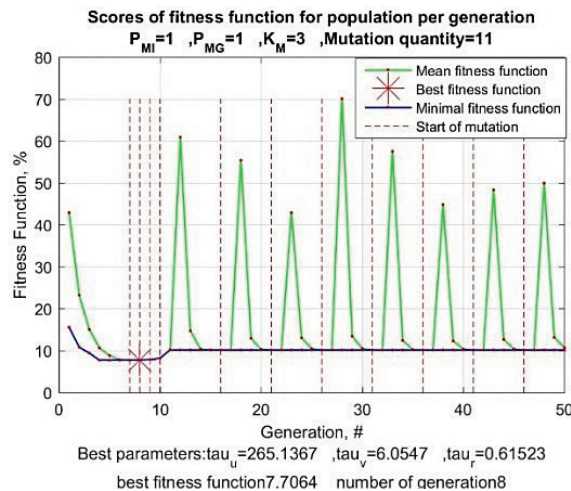


Рис. 9. График минимальных и средних значений фитнес-функции в поколении
Fig. 9. Minimum and Mean Fitness-Function Values per Generation

Финальные испытания ГА для идентификации ММДС по графику маневра «Циркуляция» представлены на рис. 10 и 11. Параметры мутации ($P_m = 0,01$, $P_{mg} = 0,1$, $K_m = 3$) были изменены так, чтобы не вызывать чрезмерных изменений особей в популяции.

Заметно возросло количество мутаций — после 10-го поколения она стала наблюдаться каждый раз. Минимум фитнес-функции был получен на 38-м поколении, при этом изменения далее также существовали, но были не такими весомыми и находились около минимума. Из этого следует, что поиск посредством ГА можно было считать оконченным на 38-м поколении.

Испытание ГА в реальном времени. Для проверки работы ГА в качестве средства идентификации ММДС в настоящем времени будет симулироваться маневр «Зиг-Заг», который

так же, как и маневр «Циркуляция», используется для определения маневренных характеристик судна^{2,3,4,5}.

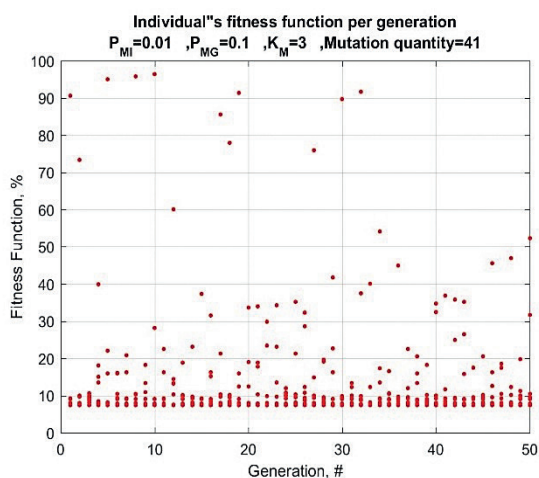


Рис. 10. График значений фитнес функций всех особей в популяции на 50 поколений
Fig. 10. Fitness-Function Values for All Individuals in the Population over 50 Generations

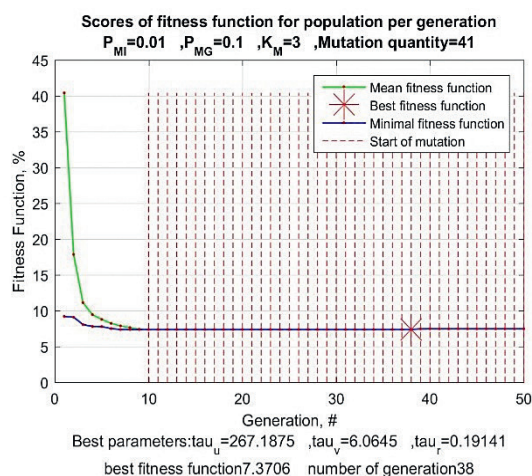


Рис. 11. График минимальных и средних значений фитнес-функции в поколении
Fig. 11. Minimum and Mean Fitness-Function Values per Generation

Для настройки параметров на временных отрезках в 10 с взят замер погрешности в процентах от эталонных показателей. В качестве эталонных показателей ММДС используются результаты наблюдателя. Полученные результаты погрешности применяются для идентификации параметров Response-Type моделей (Nomoto) именно на основе данных маневров «Зиг-Заг» [ICTIS, 2025].

Метод одновременной тонкой настройки нескольких параметров ММГ-модели на основе реальных данных ходовых испытаний также показывает хорошие результаты [10]. По факту наблюдатель отражает работу измерительной системы судна (системы глобального позиционирования, лаги, акселерометры). Так как маневр «Зиг-заг» осуществляется переключением руля поочередно на левый и правый борт на 10° при достижении отклонения от изначального курса судна на 10° , за настоящие показания курса будем принимать показания наблюдателя. Изменение параметров судна будем считать как изменения параметров наблюдателя. Начальные параметры наблюдателя и его последующие значения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры наблюдателя

Table 2

Observer Parameters

$t < 60, \text{ c}$			$t > 60, \text{ c}$		
τ_u	τ_v	τ_r	τ_u	τ_v	τ_r
267,19	6,06	0,19	250	10	2

² ИМО Резолюция MSC.137(176) // Стандарты маневренных качеств судов, 2002.

³ ИМО Циркулярное письмо MSC/Circ.1053 // Пояснения к стандартам маневренных качеств судна, 2002.

⁴ Руководство по определению маневренных характеристик судов / Российский морской регистр судоходства (РМРС). СПб.: РМРС, 2005. 16 с.

⁵ Guide for vessel maneuverability American Bureau of Shipping, 2006. 124 с.

Графики скоростей и траекторий движения при текущих условиях моделирования без адаптации представлены на рис. 12 и 13. Точками на графиках представлены места замера погрешностей, согласно временным отрезкам. Красным пунктиром обозначен момент изменения характеристик судна.

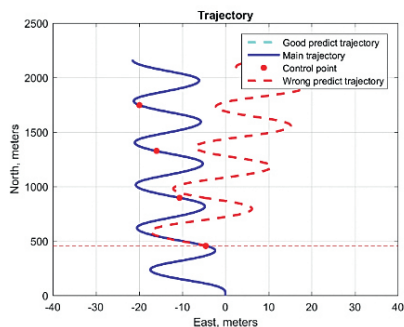


Рис. 12. Траектории движения судна
Fig. 12. Ship Trajectories

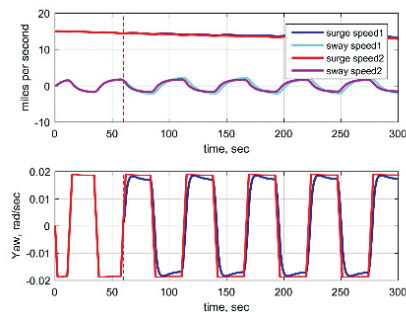


Рис. 13. Графики скоростей судна
Fig. 13. Ship Speed Profiles

Введем адаптацию, установив начало условием поиска отклонением в 5 % суммарной средневзвешенной процентной погрешности. Условия настройки ГА приведены в табл. 3.

Таблица 3

Условия настройки ГА для идентификации в текущем режиме

Table 3

GA Settings for Real-Time Identification

Количество особей в популяции	Количество поколений	Разрядность поиска, n	Вероятность мутации особи P_{mi}	Вероятность мутации гена P_{mg}	Количество мутируемых генов K_m
10	30	10	0,1	0,5	4

Результат настройки ММДС посредством ГА показан на рис. 14 и 15. Розовым пунктиром на рис. 14 показана траектория при лучшей настройке ММДС.

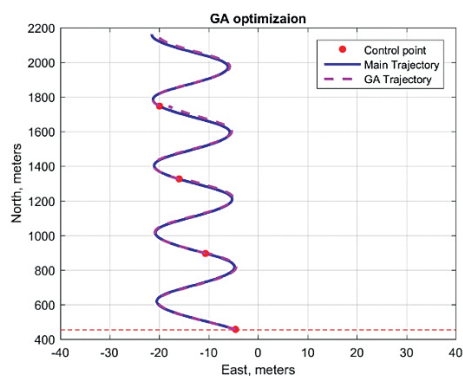


Рис. 14. Адаптация ММДС под параметры судна при изменении его свойств
Fig. 14. Adaptation of the Mathematical Model of Ship Motion to Changes in Ship Parameters

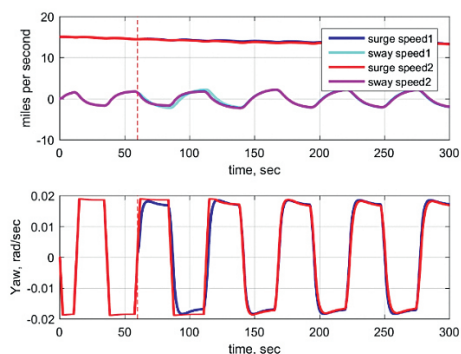


Рис. 15. Скорости движения судна и ММДС при адаптации
Fig. 15. Ship and Mathematical-Model Speeds during Adaptation

После завершения адаптации алгоритм загружает новую настройку параметров ММДС. График траекторий движения судна и показаний ММДС представлен на рис. 16.

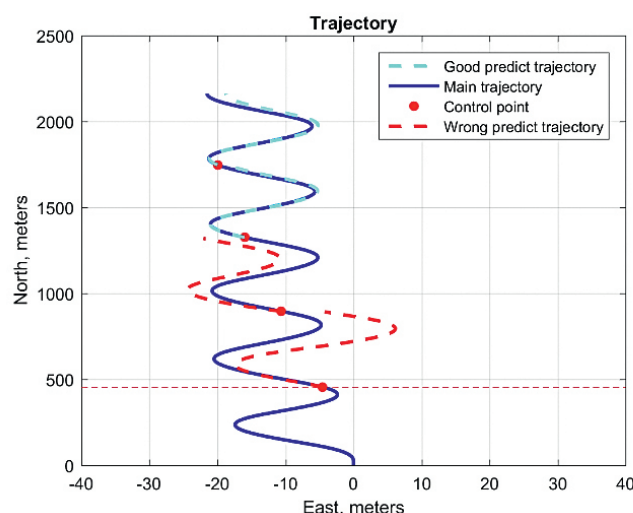


Рис. 16. График траекторий движения судна и показаний ММДС
Fig. 16. Ship Trajectory and Mathematical-Model Output

На втором и третьем временном отрезке показания ММДС были ошибочными. Причины заключаются в том, что в начале второго промежутка были изменены параметры движения судна, а так как предыдущий отрезок был без погрешностей, адаптация не была запущена. Третий промежуток настраивался, исходя из показаний наблюдателя на втором отрезке, но при изменении параметров судна его ходовые качества не могут изменяться мгновенно. Из этого следует, что при переходном процессе алгоритм не способен распознать фактические характеристики судна. Адаптация проводится по данным наблюдателя, но в данном промежутке они соответствуют промежуточным характеристикам. Генетический алгоритм определил, как нужно настроить ММДС, чтобы траектория совпала, но из-за переходного процесса потребовался еще один промежуток. На четвертом и пятом промежутках траектории практически полностью совпадают.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. С задачей первичной идентификации параметров ММДС генетический алгоритм удачно справился. По сравнению с суммарной средневзвешенной погрешностью при ручном подборе, результат настройки ММДС посредством ГА оказался лучше на 4 %. Остаток погрешности обусловлен неточностью ММДС, так как она является упрощенной, и расчеты ведутся только в трех плоскостях движения, а также возможными нарушениями при проведении ходовых испытаний судна и фиксировании параметров во время маневра «Циркуляция».
2. Адаптация генетическим алгоритмом ММДС была произведена успешно. Суммарная средневзвешенная процентная погрешность по всем показателям в конце адаптации оказалась равна 5,37 %. Эффективность эволюционных алгоритмов, в том числе СМА-ES, при идентификации параметров моделей Nomoto, по данным *zig-zag* тестов, подтверждается и в современных исследованиях [10]. Параметры ММДС, которые определил ГА, равны: $\tau_u = 251,1$ с, $\tau_v = 10,31$ с, $\tau_r = 2,2$ с. Данные параметры настройки практически совпадают с теми, на которые изменились параметры судна, указанные в табл. 3.
3. Точность адаптации можно повысить за счет увеличения особей в поколениях, количества поколений и разрядностью поиска искомых величин, также возможно улучшение поиска за счет изменения параметров мутации. Изменение текущих настроек поиска приведет к увеличению расчетной нагрузки и времени адаптации соответственно. С настройками, при которых проводились испытания, время адаптации на каждом отрезке не превышало 10 с для каждого этапа. После 4-го этапа адаптация не потребовалась, так как погрешность имела допустимые значения. Метод адаптации ММДС посредством ГА справился с поставленной задачей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушков С. В. Упрощенная математическая модель движения судна с активными средствами управления и оценка ее адекватности / С. В. Глушков, И. А. Мажилин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2019. — № 54–55. — С. 39–48. — EDN YSIAGK.
2. Bańka Stanisław. A Comparative and Experimental Study on Gradient and Genetic Optimization Algorithms for Parameter Identification of Linear MIMO Models of a Drilling Vessel / Stanisław Bańka [et al] // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. — Vol. 25. — No. 4. — University of Zielona Góra. — 2015. — Pp. 877–893. — DOI:10.1515/amcs-2015-0063.
3. Батищев Д. И. Генетические алгоритмы решения экстремальных задач / Д. И. Батищев. — Н. Новгород: Нижегородский государственный университет, 1995. — 62 с.
4. McGookin E. W. Parameter optimisation of a non-linear tanker control system using genetic algorithms IEE / E. W. McGookin. — 1997. — С. 37–42. — DOI: 10.1049/cp:19971152.
5. Naeem W. Pure Pursuit Guidance and Model Predictive control of an Autonomous Underwater Vehicle for Cable/Pipeline tracking / W. Naeem, R. Sutton, M. Ahmad // Marine and Industrial Dynamic Analysis Research Group – Plymouth, PL4 8AA, UK : Department of Mechanical and Marine Engineering of the University of Plymouth.
6. Miller A. Ship Model Identification with Genetic Algorithm Tuning. *Appl. Sci.* 2021, 11, 5504. — DOI: 10.3390/app11125504.
7. Chen, Changyuan & Tello Ruiz, Manases & Lataire, Evert & Delefortrie, Guillaume & Mansuy, Marc & Mei, Tianlong & Vantorre, Marc. (2019). Ship Manoeuvring Model Parameter Identification Using Intelligent Machine Learning Method and the Beetle Antennae Search Algorithm. 10.1115/OMAE2019-95565.
8. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. — Москва: Горячая линия Телеком, 2013. — 384 с. — EDN SDSPSR.
9. Suyama R. Parameter fine-tuning method for MMG model using real-scale ship data / R. Suyama, R. Matsushita, R. Kakuta [et al] // Ocean Engineering. — 2024. — Vol. 298. — Pp. 117323. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117323.
10. Fu L. Parameter Identification of Ship Nomoto Model Based on CMA-ES / L. Fu, M. Zheng, A. Guo, Z. Yan, Y. Yang, S. Ding, X. Chu // 2025 8th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS) – 2025. — Pp. 1464–1470. — DOI: 10.1109/ICTIS68762.2025.11214921.

REFERENCES

1. Glushkov, S. V. and I. A. Mazhirin. "Simplified mathematical modelling of ships with active control elements movement and its accuracy measurement." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 54–55(2019): 39–48.
2. Bańka, S., M. Brasel, P. Dworak and K. Jaroszewski. "A Comparative and Experimental Study on Gradient and Genetic Optimization Algorithms for Parameter Identification of Linear MIMO Models of a Drilling Vessel." *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 25.4 (2015): 877–893. DOI: 10.1515/amcs-2015-0063.
3. Batischev, D. I. *Geneticheskie algoritmy resheniya ekstremal'nykh zadach*. N. Novgorod: Nizhegorodskiy gosudarstvennyy universitet, 1995: 62.
4. McGookin E. W., D. J. Murray-Smith, Y. Li and T. I. Fossen. "Parameter optimisation of a nonlinear tanker control system using genetic algorithms." *Second International Conference On Genetic Algorithms In Engineering Systems: Innovations And Applications*. 1997: 37–42. DOI: 10.1049/cp:19971152.
5. Naeem, W., R. Sutton and M. Ahmad . "Pure Pursuit Guidance and Model Predictive control of an Autonomous Underwater Vehicle for Cable/Pipeline tracking." *Marine and Industrial Dynamic Analysis Research Group – Plymouth, PL4 8AA UK* : Department of Mechanical and Marine Engineering of the University of Plymouth.
6. Miller, A. "Ship Model Identification with Genetic Algorithm Tuning." *Applied Sciences* 11.12 (2021). DOI: 10.3390/app11125504.
7. Chen, C., M. Vantorre et al. "Ship Manoeuvring Model Parameter Identification Using Intelligent Machine Learning Method and the Beetle Antennae Search Algorithm." *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – Volume 7B: Ocean Engineering*. 2019: V07BT06A028. DOI: 10.1115/OMAE2019-95565.

8. Rutkovskaya, D., M. Pilin'skiy and L. Rutkovskiy. *Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy*. Moskva: Goryachaya liniya-Telekom, 2013: 384.
9. Suyama, R., A. Maki et al. "Parameter fine-tuning method for MMG model using real-scale ship data." *Ocean Engineering* 298 (2024): 117323. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117323.
10. Fu, L., X. Chu et al. "Parameter Identification of Ship Nomoto Model Based on CMA-ES." *2025 8th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. 2025: 1464–1470. DOI: 10.1109/ICTIS68762.2025.11214921.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мажирин Илья Аркадьевич —
соискатель ученой степени,
инженер-инспектор 1-й категории
ДВФ ФАУ «Российский морской
регистр судоходства»
690003, Российская Федерация,
г. Владивосток, ул. Станюковича, д. 29а
e-mail: iliamazhirin@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mazhirin, Ilia A. —
applicant for an Academic degree,
Engineer-Surveyor of the 1st category
FEB FAI "Russian Maritime
Register of Shipping"
29a Stanyukovicha Street, Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: iliamazhirin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 06 мая 2026 г.
Received: May 6, 2026.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА ОЦЕНКИ РИСКА В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕЗЭКИПАЖНОГО БУКСИРА В ПОРТОВОЙ ЗОНЕ

В. В. Семенов, В. В. Каретников А. А. Буцанец

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрены методы оценки риска при эксплуатации безэкипажного портового буксира в акватории порта. Актуальность темы обусловлена ростом тоннажа и размеров обслуживаемых судов, а также активным внедрением автономных технологий судоходства (МАНС второго уровня по классификации IMO). На этом уровне система самостоятельно выполняет основные навигационные и маневровые задачи, а оператор берегового центра дистанционного управления осуществляет мониторинг и вмешивается в процесс управления только в нештатных ситуациях. Показано, что переход к безэкипажной эксплуатации существенно трансформирует структуру операционных рисков: значительно снижается опасность для людей на борту, однако резко возрастает роль отказов автономных систем, потери связи, киберугроз и ошибок дистанционного оператора в условиях высокой интенсивности портового движения. На основе анализа отечественных и зарубежных научных источников выполнен обзор современных методов оценки риска (HAZOP / CHAZOP, SWIFT, HRA, PHA, анализ сценариев и др.). Показаны преимущества и ограничения каждого метода применительно к сложным техническим системам с высоким уровнем автоматизации и дистанционным управлением. Обоснована целесообразность применения комбинированного (гибридного) подхода, объединяющего предварительный анализ опасностей, структурированное исследование сценариев, анализ надежности человека и метод экспертных оценок. В результате исследования разработана комплексная карта оценки рисков, включающая 12 ключевых групп опасных факторов. Выделены критические риски (эксплуатация в штормовую погоду и киберугрозы), определены их вероятность и тяжесть последствий по пятибалльной шкале, а также предложены конкретные организационно-технические управляющие меры по снижению рисков. Полученные результаты создают научно-методическую основу для формирования перечня рисков в целях разработки системы управления безопасностью, подготовки эксплуатационной документации и дальнейшего совершенствования нормативно-правовой базы безопасной эксплуатации автономных портовых буксиров.

Ключевые слова: безэкипажный портовый буксир, автономные суда, автономные морские суда, оценка риска, методы HAZOP, SWIFT, HRA, человеческий фактор, кибербезопасность, портовые операции, экспертные оценки, комплексная карта рисков.

Для цитирования:

Семенов, В. В. Обоснования выбора метода оценки риска в области применения безэкипажного буксира в портовой зоне / В. В. Семенов, В. В. Каретников А. А. Буцанец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 4. С. 638–649. EDN GQWUEA. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-638-649.

RATIONALE FOR SELECTING A RISK ASSESSMENT METHOD FOR UNMANNED TUG OPERATIONS IN A PORT AREA

V. V. Semenov, V. V. Karetnikov, A. A. Butsanets

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The article examines risk assessment methods for the operation of an unmanned port tug in port waters. The relevance of the study is determined by the increasing tonnage and dimensions of serviced vessels and the active introduction of autonomous shipping technologies, including MASS at the second level of autonomy according to the IMO classification. At this level, the system independently performs basic navigation and manoeuvring tasks,

while a shore-based remote operator monitors its operation and intervenes only in abnormal situations. The transition to unmanned operation substantially changes the structure of operational risks: risks to people on board are reduced, whereas the significance of autonomous system failures, loss of communication, cyber threats, and remote-operator errors increases under conditions of intensive port traffic. Based on an analysis of Russian and international scientific literature, modern risk assessment methods, including HAZOP/CHAZOP, SWIFT, HRA, PHA, and scenario analysis, are reviewed. Their advantages and limitations for highly automated and remotely controlled technical systems are identified. A combined approach integrating Preliminary Hazard Analysis, the Structured What-If Technique, Human Reliability Assessment, and expert assessment is substantiated. A comprehensive risk assessment map comprising 12 key groups of hazards is developed. Critical risks associated with severe weather conditions and cyber threats are identified, their probability and consequence severity are assessed on a five-point scale, and organizational and technical risk-control measures are proposed. The results provide a methodological basis for developing a risk inventory, a safety management system, operational documentation, and further regulatory provisions for the safe operation of unmanned port tugs.

Keywords: unmanned port tug, autonomous vessels, Maritime Autonomous Surface Ships (MASS), risk assessment, HAZOP, SWIFT, HRA, human factors, cybersecurity, port operations, expert assessment, comprehensive risk assessment map.

For citation:

Semenov, Vasily V., V. V. Karetnikov and A. A. Butsanets. "Rationale for selecting a risk assessment method for unmanned tug operations in a port area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.4 (2026): 638–649. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-638-649.

Введение (Introduction)

Порт является связующим звеном между наземным и водным транспортом, в основном предоставляя услуги по обработке и временному хранению грузов, обслуживанию судов и пассажиров. Он может быть распределительным центром для товаров внутренней и внешней торговли или перевалочным пунктом между морским и другими видами транспорта.

В системе портовой инфраструктуры работа буксиров является одним из важных элементов системы обеспечения безопасности судоходства в портовых водах, позволяющей обеспечить безопасный заход и выход судов, их швартовку, обслуживание и перемещение на акватории порта. Учитывая рост тоннажа и водоизмещения судов, работа портовых буксиров сопряжена с определенными операционными рисками при заходе и выходе судов из акватории порта, а также при выполнении швартовных операций или обработки судов. Аварийные происшествия, возникающие из-за небезопасной работы портовых буксиров, оказывают влияние на эффективность и конкурентоспособность порта, а также экологическую безопасность.

Концептуальные исследования, разрабатывающие научно-технологический базис для создания морских автономных надводных судов (МАНС), переходят от концептуальных разработок к практическим испытаниям и сбору фактических данных благодаря прогрессу в области искусственного интеллекта, скорости передачи данных и бесперебойной работы судна при автоматическом управлении [1, 2]. Многие страны провели испытания МАНС в прибрежных морских районах и внутренних водных путях, подтвердив технологическую готовность сенсоров, планирования маршрута следования судна и управления его движением [3, 4].

Поэтому в настоящее время направление исследований частично смещается к вопросам, связанным с обеспечением безопасной и соответствующей правилам эксплуатации судов в морских и речных акваториях. Международная морская организация (ИМО) предложила классификацию уровней автономности по степени участия человека, задав единый ориентир для определения задач человека и системы [5–7]. Полностью беспилотные суда сталкиваются с задачами обеспечения безотказной работы систем функционирования судна и нормативно-правовой проработки, в том числе ответственности при возникновении аварийных происшествий, поэтому средний уровень автоматизации (MASS Level 2: *система ведет, человек контролирует*) остается преобладающей формой функционирования [7, 8]. На этом уровне система выполняет основные навигационные задачи, а бортовой или береговой оператор ведет мониторинг и вмешивается в процесс управления только в случае необходимости.

Вместе с тем рост автоматизации не приводит к линейному снижению рисков возникновения ошибок, так называемого *человеческого фактора*. Более 80 % традиционных аварийных происшествий и аварий связаны с человеком, однако при втором уровне автономности судна его роль меняется с прямого оператора на наблюдателя, который вмешивается в управление только в нестандартных ситуациях. Это вызывает изменения в рабочей нагрузке, когнитивных процессах и принятии решений [9, 10]. В таких ситуациях высокорисковые (аварийные) ситуации чаще возникают из-за информационных расхождений, нечеткого разграничения функций и сбоев взаимодействия между человеком и автоматикой [11, 12].

Классические рамки анализа эксплуатации судов (ошибки, искажения, нарушения) недостаточно раскрывают новые проблемы обеспечения безопасности в процессе эксплуатации безэкипажного буксира в портовой зоне. Поэтому обеспечение безопасности судоходства при выполнении работы безэкипажными буксирами и уделение должного внимания управлению рисками является важным и актуальным вопросом для морской отрасли.

Целью исследования является разработка карты оценки рисков для создания опросных листов и проведения опроса экспертов в части обеспечения безопасности судоходства в портовой зоне при применении безэкипажных портовых буксиров.

Задачи исследования:

- выполнить обзор и сравнительный анализ существующих методов оценки риска (HAZOP, SWIFT, HRA, PHA и др.);
- обосновать выбор метода (методов) оценки риска эксплуатации безэкипажного портового буксира в портовой зоне с учетом специфики автономных технологий и дистанционного управления;
- проанализировать особенности эксплуатации безэкипажных буксиров и выявить новые риски, возникающие при переходе к автономным судам;
- разработать комплексную карту оценки рисков.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Оценка риска осуществляется с различной степенью глубины и детализации с использованием одного или нескольких методов оценки риска. Форма проведения оценки риска и получаемые результаты должны быть совместимы с установленными критериями риска и целями исследования. При выборе соответствующего метода важно обеспечить его соответствие объекту и контексту анализа, а также возможность получения результатов, способствующих повышению осведомленности о рисках и выработке эффективных мер по их обработке. Метод должен обеспечивать *наблюдаемость, воспроизводимость и верифицируемость* как процесса, так и конечных результатов.

Выбор конкретного метода оценки риска определяется рядом ключевых факторов. К ним относятся: цель исследования, уровень ответственности принимаемых решений, тип и масштаб анализируемого риска, возможные последствия опасных событий, доступность информации и данных, степень неопределенности, сложность системы, а также имеющиеся ресурсы (время, бюджет, квалификация экспертов). Кроме того, следует учитывать обязательные нормативные и правовые требования, а также возможность последующего обновления оценки риска. Простой, но корректно примененный метод часто оказывается более эффективным, чем сложная методика, реализованная с нарушениями.

В научной литературе методы оценки риска классифицируются по различным признакам: от качественных до количественных и гибридных. Рассмотрим наиболее применимые методы в контексте анализа безопасности сложных технических систем, включая автономные суда.

Метод HAZOP (Hazard and Operability Study) представляет собой структурированное исследование опасности и работоспособности [13]. Данный метод основан на применении направляющих (ключевых) слов («больше», «меньше», «нет», «иное» и др.) для систематического выявления возможных отклонений от проектных параметров, их причин и последствий. HAZOP, являясь качественным методом, наиболее эффективен на стадии детального проектирования технических систем, процессов и программного обеспечения (в последнем случае часто используется модификация

CHAZOP). К преимуществам метода относятся высокая систематичность, междисциплинарный подход и детальная проработка причинно-следственных связей. Основными недостатками выступают значительная трудоемкость и высокие требования к качеству исходной документации.

Метод SWIFT (Structured What-If Technique) — структурированный анализ сценариев по принципу «Что, если?». Он служит более гибкой и оперативной альтернативой HAZOP. Метод предполагает командное обсуждение потенциальных опасных сценариев с использованием вопросов-подсказок. SWIFT особенно полезен при анализе крупных систем, организационных изменений и новых видов риска. Его сильными сторонами являются оперативность проведения, минимальные требования к предварительной подготовке и удобство формирования реестра рисков. Однако эффективность метода сильно зависит от квалификации ведущего и состава экспертной группы [14].

Анализ надежности человека (HRA — Human Reliability Assessment) применяется для оценки влияния человеческого фактора и возможных ошибок операторов на безопасность системы. Метод может использоваться как в качественном, так и в количественном формате. Он особенно актуален для систем с дистанционным управлением, где роль человека остается значимой. HRA позволяет выявить критические ошибки и разработать меры по их минимизации, однако моделирование сложного поведения оператора сопряжено с определенными методологическими трудностями [15].

К более простым инструментам относятся контрольные листы (checklists), которые обеспечивают проверку учета известных опасностей на основе имеющегося опыта, а также предварительный анализ опасностей (РНА), применяемый на ранних стадиях проекта при ограниченном объеме информации. Кроме того, широкое распространение получил *анализ сценариев*, позволяющий рассматривать альтернативные варианты развития событий («лучший», «худший» и «ожидаемый» случаи), что особенно полезно в условиях высокой неопределенности.

Для обоснования выбора метода оценки риска при эксплуатации безэкипажного буксира в портовой зоне рекомендуется использовать комбинированный (гибридный) подход. На начальных этапах целесообразно применять метод РНА и SWIFT для быстрой идентификации опасностей. Детальный анализ технических и программных компонентов автономной системы следует проводить с помощью комбинации методов HAZOP / CHAZOP.

Учет рисков, связанных с действиями дистанционных операторов, требует включения метода HRA. Для оценки сложных сценариев (потеря связи, навалы, кибератаки в стесненной акватории) эффективно дополнять анализ байесовскими сетями и методом анализа сценариев. Такой интегративный подход обеспечивает необходимую полноту, системность и адаптивность оценки рисков к специфике технологий при эксплуатации безэкипажных судов в условиях портовой зоны, при этом сохраняя баланс трудозатрат и научной обоснованности.

Как правило, использование метода экспертных оценок (схема на с. 642) обусловлено отсутствием достаточной статистической информации в исследуемой области. Для решения поставленных в работе задач: эксплуатации безэкипажных буксиров в портовой зоне, в частности, выполняемых работ безэкипажными портовыми буксирами, одним из возможных способов решения задачи по оценке рисков работы безэкипажных портовых буксиров (БПБ) является привлечение отраслевых специалистов в роли экспертов для обработки их мнений с использованием *метода экспертных оценок*, алгоритм выполнения которого приведен на рисунке.

Экспертом является человек высокой квалификации, способный использовать свои знания для решения поставленных перед ним задач или сформулированных вопросов для диагностики, прогнозирования, выбора варианта решения для функционирования технической или управленческой системы. Экспертный анализ включает пять этапов [16–18]:

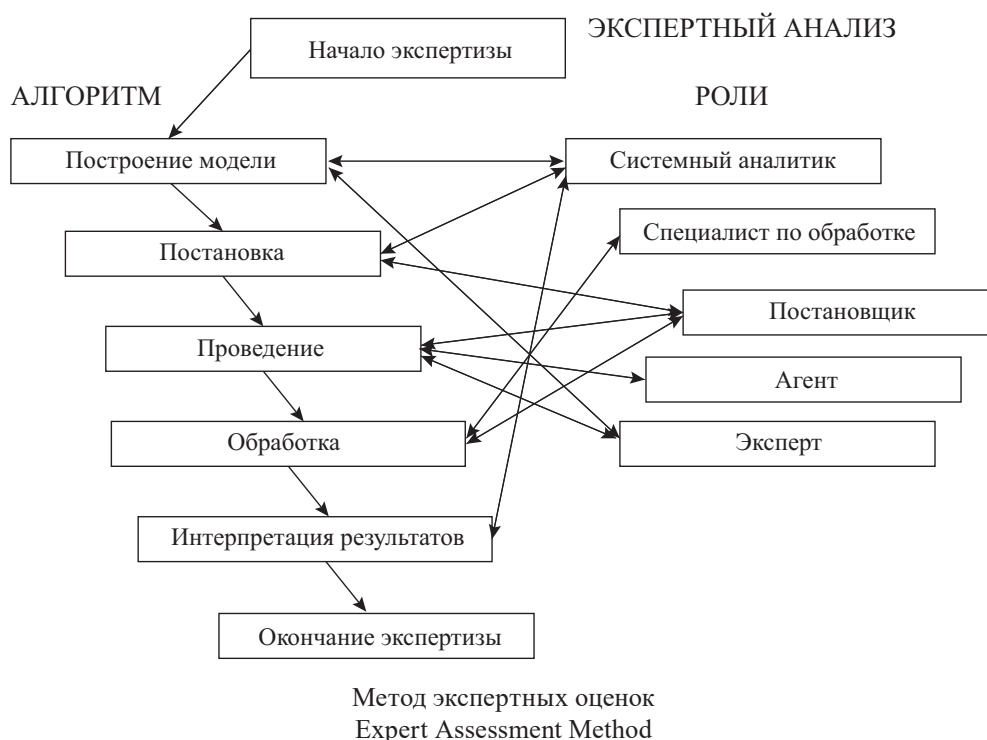
1. Построение модели — структурирование предметной области и задачи анализа. Ведущую роль играет системный аналитик, который совместно с экспертами определяет факторы и их взаимосвязи.

2. Постановка экспертного анализа — формализация процедуры получения экспертных оценок. Специалист-постановщик вместе с аналитиком выбирают методы оценивания, шкалы, критерии, разрабатывает анкеты и сценарии опроса.

3. Выполнение экспертного опроса — получение оценок от основной группы экспертов. Обычно требуется взаимодействие постановщика с экспертами, однако при его занятости, большом числе или удаленности экспертов может привлекаться посредник — агент.

4. Обработка экспертных оценок — получение обобщенного мнения на основе множества мнений или оценок. В процессе участвуют постановщик и специалист по обработке, реализующий корректную методику.

5. Интерпретация результатов — ответ на основной вопрос исследования. Ведущую роль играет системный аналитик, трактующий результаты в соответствии с исходной моделью.



На каждом этапе выполнения экспертизы необходимо наличие определенных компетенций у лиц, занимающихся ее выполнением. В данной работе предлагается комплексная карта оценки рисков при работе БПБ в портовой зоне, являющаяся базисом для разработки опросных листов. С учетом того, что экспертный анализ должен выполняться с помощью формальных или эвристических методов, а поскольку при разработке карты оценки рисков работы безэкипажного портового буксира невозможно указать или в явном виде сформировать количественные показатели выполняемых рабочих операций, следует использовать эвристические методы. Для обозначения таких понятий, как *переменная*, *характеристика*, *параметр*, *признак*, *цель* и *критерий* в эвристических моделях используется один термин — «фактор». Эвристическая модель представляет собой множество взаимосвязанных и взаимодействующих факторов, оказывающих влияние на изучаемое явление и совокупность исследуемых объектов.

Результаты и их обсуждение (Results and Discussion)

Комплексная карта оценки рисков, приведенная в таблице, представляет собой систематизированный перечень основных опасных факторов, возникающих при выполнении производственных задач БПБ в акватории порта. Для каждого выявленного риска определены вероятность возникновения (P) и тяжесть последствий (V) по пятибалльной шкале (от 1 до 5), а также предложены управляющие меры по его снижению. Оценка проведена с учетом специфики работы безэкипажного буксира: отсутствия экипажа на борту, дистанционного управления из берегового центра (СДУ) и повышения требований к надежности судовых энергетических установок и систем.

Комплексная карта оценки рисков при работе безэкипажного буксира в портовой зоне
Comprehensive Risk Assessment Map for Unmanned Tug Operations in a Port Area

№ п/п.	Особенности выполнения производственной задачи	Опасный фактор	Возможные происшествия	<i>P</i>	<i>V</i>	Уровень риска	Управляющие меры
1	Эксплуатация в штормовую погоду	Сложные гидро-метеорологические условия	Легкие повреждения; пробоина и средние повреждения корпуса, повреждение систем и механизмов, контакт с грунтом; гибель БПБ	4	5	Критический	учёт метеословесий, взаимодействие с СУДС, инструктаж оператора СДУ, выбор оптимального маршрута и скорости, достаточная крапцевая защита
2	Переход по акватории порта под контролем оператора СДУ	Особенности акватории, интенсивное движение	Столкновение, пробоина, повреждение систем, гибель БПБ	4	4	Высокий	Многосенсорное техническое зрение, системы предотвращения столкновений, непрерывный контроль оператора СДУ
3	Работоспособность оборудования на борту БПБ	Отказы оборудования МО, ГД, электрооборудования	Потеря управляемости, задымление, пожар, поражение током	3	5	Высокий	Регламентное ТО, резервирование, наличие дежурного буксира, аварийные источники питания
4	Подход к борту буксируемого судна (мидель, нос, корма, транцевая часть)	Удар о буксируемый объект	Легкие повреждения, пробоина, повреждение рулевого комплекса буксируемого судна, гибель БПБ или буксируемого судна	4	4	Высокий	Ограничение скорости (≤ 6 уз), контроль дистанции системами технического зрения, учет гидродинамических сил, крапцевая защита
5	Работа с буксирным тросом и маневры у буксируемого судна	Попадание троса в движители, влияние подзоров и винтового рулевого комплекса	Повреждение винтового комплекса, потеря управляемости	3	4	Высокий	Повышенное внимание оператора СДУ, проверка охлаждения оборудования буксируемого судна, безопасная дистанция
6	Человеческий фактор (оператор СДУ)	Ошибки оператора дистанционного управления	Повреждения различной степени тяжести, вплоть до гибели судов	3	4	Средне-высокий	Допуск только операторов с опытом работы на традиционных буксирах, регулярные тренировки в симуляторах, система «четыре глаз»

Окончание таблицы

7	Подход к причалу	Удар о причал	Повреждение причала и/или БПБ, гибель буксира	3	3	Средний	Системы автоматической швартовки (САШ), контроль скорости, отсутствие посторонних предметов
8	Работы в закрытых помещениях (при техническом обслуживании и ремонте)	Недостаток кислорода, взрывоопасная смесь, токсичные газы	Удушье, пожар, травмы, гибель людей	2	5	Высокий	Газоанализ, принудительная вентиляция, разрешение на работы, инструктаж
9	Работа на высоте	Нарушение ТБ, погодные условия	Падение, травмы, гибель людей	2	5	Высокий	Страховочные средства, страхующее лицо, учет метеоусловий
10	Контроль остойчивости	Потеря остойчивости	Большой крен/дифферент, опрокидывание, гибель БПБ	3	5	Высокий	Расчёт остойчивости перед операцией, непрерывный контроль в процессе
11	Бункеровка топливом	Разлив нефтепродуктов	Загрязнение акватории, возгорание, отравление, гибель людей и БПБ	2	5	Высокий	Сертифицированное оборудование, чек-листы, обучение персонала, процедуры аварийного реагирования
12	IT-безопасность и киберугрозы	Угрозы информационной безопасности	Частичная или полная потеря контроля над БПБ	3	5	Критический	Аутентификация, алгоритмы реагирования на инциденты, постоянная доступность IT-специалистов, мониторинг аномалий

Примечание. Шкала оценки: *P* (вероятность) и *V* (тяжесть последствий) оцениваются от 1 до 5, где 1 — минимальное значение, 5 — максимальное. Уровень риска: низкий (1–4), средний (5–9), высокий (10–16), критический (17–25).

Наиболее значимыми являются критические риски, связанные с эксплуатацией в сложных гидрометеорологических условиях или киберугрозами. К ним относятся эксплуатация в штормовую погоду ($P = 4$, $V = 5$) и угрозы IT-безопасности ($P = 3$, $V = 5$). В обоих случаях возможны тяжелые повреждения корпуса, потеря управляемости или полная гибель буксира. Управляющие меры включают обязательный предварительный анализ метеоусловий, взаимодействие с системой управления движением судов (СУДС), инструктаж оператора СДУ, многоуровневую систему связи и алгоритмы реагирования на киберинциденты.

Высокие риски преобладают в следующих группах. При переходе в акватории порта под контролем оператора СДУ (особенности акватории и интенсивное движение) вероятность столкновения оценивается как $P = 4$, $V = 4$. Возможны пробойны корпуса, повреждение систем и механизмов вплоть до гибели БПБ. Снижение риска достигается за счет многосенсорного технического зрения, систем предотвращения столкновений и непрерывного мониторинга оператором.

Отказы оборудования машинного отделения, главного двигателя и электрооборудования ($P = 3$, $V = 5$) могут привести к потере управляемости, задымлению, пожару или поражению током. Управление осуществляется через регламентное техническое обслуживание, резервирование систем, наличие дежурного буксира и аварийных источников питания.

Маневры у буксируемого судна (подход к миделю, носу, корме, транцу) сопровождаются риском удара ($P = 4$, $V = 4$). Последствиями могут стать повреждения корпуса, винторулевого комплекса или даже гибель одного из судов. На каждом этапе выполнения экспертизы необходимо наличие определенных компетенций у лиц, занимающихся ее выполнением. Ключевыми мерами является ограничение скорости (не более 6 уз.), контроль дистанции и угла подхода с помощью систем технического зрения, учет гидродинамических сил от движителей буксируемого судна и наличие достаточной кранцевой защиты.

Человеческий фактор (ошибки оператора СДУ) оценивается как $P = 3$, $V = 4$. Риск снижается путем допуска к работе только специалистов с опытом на традиционных буксирах, регулярных тренировок в симуляторах и применения принципа «четыре глаза».

К высокому уровню также относятся бункеровка топливом (риск разлива нефтепродуктов и возгорания), потеря остойчивости, работы в закрытых помещениях и на высоте. Для всех этих сценариев предусмотрены следующие процедуры: чек-листы, газоанализ, принудительная вентиляция, страховочные средства, расчет остойчивости перед операцией и обучение персонала.

Средние риски (уровень 5–9) наблюдаются при подходе к причалу ($P = 3$, $V = 3$). Основными превентивными мерами являются использование систем автоматической швартовки, контроль скорости и отсутствие посторонних предметов между буксиром и причалом.

В целом разработанная карта демонстрирует смещение рисков по сравнению с традиционными буксирами: снижение опасности для людей на борту и существенное возрастание роли надежности автономных систем, связи и кибербезопасности. Полученные результаты позволяют сформировать реестр рисков, обосновать выбор методов их оценки (HAZOP, HRA, анализ сценариев) и разработать эффективную систему управления безопасностью эксплуатации безэкипажного портового буксира в портовой зоне. Карта рекомендуется к периодическому обновлению по мере накопления эксплуатационных данных и совершенствования автономных технологий, например, при выполнении полунатурных или натурных испытаний [19–22].

Выводы (Conclusions)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы.

1. В работе рассмотрены вопросы адаптации традиционных методов оценки риска к условиям эксплуатации безэкипажных портовых буксиров. Предложено использовать гибридный подход, сочетающий PNA и SWIFT на начальном этапе, HAZOP / CHAZOP для детального анализа технических и программных систем, HRA для учета человеческого фактора дистанционного оператора и метод экспертных оценок, что должно обеспечить необходимую полноту, системность и воспроизводимость результатов при разумных трудозатратах.

2. Разработанная комплексная карта рисков позволила выявить критические (штормовые условия, киберугрозы) и высокие риски (столкновения, отказы оборудования, маневры у буксируемого судна), а также предложить конкретные организационно-технические меры их снижения. Показано смещение рисков: снижение угрозы для людей на борту при одновременном существенном повышении значимости надежности автономных систем, связи и информационной безопасности.

3. Результаты работы создают научно-методическую основу для разработки системы управления безопасностью эксплуатации БПБ [5, 7, 19–22] и могут быть использованы при подготовке эксплуатационной документации и взаимодействии с классификационными обществами.

4. Перспективным направлением дальнейших исследований является количественная верификация карты рисков по мере накопления реальных эксплуатационных данных и проведение полномасштабных испытаний в портовых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cheng T., Veitch E. A., Utne I. B. [et al]. Analysis of Human Errors in Human-Autonomy Collaboration in Autonomous Ships Operations through Shore Control Experimental Data / T. Cheng, E. A. Veitch, I. B. Utne [et al] // Reliab. Eng. Syst. Saf. — 2024. — Vol. 246. — 110080. — EDN POIAZV. — DOI: 10.1016/j.res.2024.110080.
2. Veitch E. A Systematic Review of Human-AI Interaction in Autonomous Ship System / E. Veitch, O. A. Alsos // Saf. Sci. — 2022. — Vol. 152. — 105778. — EDN MJNNIK. — DOI: 10.1016/j.ssci.2022.105778.
3. Simulation of maneuvering trials of an unmanned or autonomous surface ship on a navigation simulator / V. Karetnikov, E. Ol'khovik, A. Butsanets, A. Ivanova // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2021. — Vol. 130 LNCE. — P. 146–156. — EDN JJVLQH. — DOI: 10.1007/978-981-33-6208-6_15.
4. A System-Theoretic Approach to Safety and Security Co-Analysis of Autonomous Ships / X. Y. Zhou, Z. J. Liu, F. W. Wang, Z. L. Wu // Ocean Eng. — 2021. — Vol. 222. — 108569. — EDN RVBLJU. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108569
5. Структурный анализ системы обеспечения автономной проводки и швартовки судов через графы состояний / С. В. Смоленцев, А. В. Брыляков, В. Г. Сенченко, А. А. Буцанец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 4–13. — EDN CQXSLE.
6. Реуцкий А. С. Оценка влияния типа используемого судового топлива на величину углеродного следа транспортной услуги / А. С. Реуцкий, В. В. Якимов, А. А. Буцанец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 87–95. — EDN ICJSQJ.
7. Смоленцев С. В. Перечень оборудования и обзор протоколов передачи данных для автономных надводных судов / С. В. Смоленцев, С. Ф. Шахнов, А. А. Буцанец // Электронные информационные системы. — 2023. — № 4 (39). — С. 10–21. — EDN UDSLXP.
8. Letting losses be lessons: Human-machine cooperation in maritime transport / S. Fan, K. Shi, J. Weng, Z. Yang // Reliab. Eng. Syst. Saf. — 2025. — Vol. 253. — 110547. — EDN NODKX. — DOI: 10.1016/j.res.2024.110547.
9. Incorporation of Human Factors into Maritime Accident Analysis Using a Data-Driven Bayesian Network / S. Fan, E. Blanco-Davis, Z. Yang [et al] // Reliab. Eng. Syst. Saf. — 2020. — Vol. 203. — 107070. — EDN DFZHYQ. — DOI: 10.1016/j.res.2020.107070.
10. Operational risk identification of maritime surface autonomous ship: A network analysis approach / X. Li, P. Oh, Y. Zhou, K. F. Yuen // Transp. Policy. — 2023. — Vol. 130. — P. 1–14. — EDN WSGPBV. — DOI: 10.1016/j.transpol.2022.10.012.
11. A methodology to define risk matrices – Application to inland water ways autonomous ships / V. Bolbot, G. Theotokatos, J. McCloskey [et al] // Int. J. Nav. Arch. Ocean Eng. — 2022. — Vol. 14. — 100457. — EDN XYKUGK. — DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2022.100457.
12. Liu P., Dong X., Wang P. An enhanced fuzzy cognitive map for human risk assessment in maritime transportation: Integrating causal mining and expert elicitation // Adv. Eng. Inform. — 2025. — Vol. 68. — 103624. — EDN YECVOR. — DOI: 10.1016/j.aei.2025.103624.
13. Грановский Э. А. Проблемы оценки риска по результатам HAZOP-исследования / Э. А. Грановский // Безопасность труда в промышленности. — 2023. — № 5. — С. 33–40. — EDN NDQEBO. — DOI: 10.24000/0409-2961-2023-5-33-40.
14. Актуализация руководств по безопасности в области оценки риска аварий на производственных объектах / М. В. Лисанов, А. А. Агапов, С. Х. Зайнетдинов [и др.] // Безопасность труда в промышленности. — 2023. — № 7. — С. 85–92. — EDN VHMXXR. — DOI: 10.24000/0409-2961-2023-7-85-92.

15. Учет влияния человеческого фактора на профессиональные риски при использовании метода дерева отказов / Д. С. Алешков, Н. Ю. Аюпова, Е. В. Бакико [и др.] // Безопасность труда в промышленности. — 2025. — № 10. — С. 32–38. — EDN ONNQXM. — DOI: 10.24000/0409-2961-2025-10-32-38.
16. Мельник П. Б. Методика формирования экспертных пулов и групп для проведения экспертно-аналитических исследований / П. Б. Мельник // Инноватика и экспертиза: научные труды. — 2017. — №. 1. — С. 39–54. — EDN YUNGIT.
17. Путивцева Н. П. Разработка программной поддержки иерархической многокритериальной процедуры оценки качества экспертов / Н. П. Путивцева // Экономика. Информатика. — 2016. — Т. 39. — № 16 (237). — С. 172–179. — EDN WXTRTJ.
18. Разработка иерархической многокритериальной процедуры оценки качества экспертов / Н. П. Путивцева, С. В. Игрунова, Е. Ю. Бекетова, С. А. Капитан // Научный результат. Информационные технологии. — 2016. — Т. 1. — №. 1. — С. 39–47. — EDN XBPXMZ. — DOI: 10.18413/2518-1092-2016-1-1-39-47.
19. Бурылин Я. В. Модель жизненного цикла буксира-автомата в системе обеспечения автономной проводки и швартовки судов в морском порту / Я. В. Бурылин, С. С. Жук, А. А. Буцанец // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2025. — Т. 17, № 5. — С. 717–727. — EDN LLIQKU. — DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-717-727.
20. Принципы оценки функциональных свойств систем автономного судовождения / С. Д. Айзинов, А. А. Буцанец, С. В. Смоленцев [и др.] // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 83–96. — EDN HNHFAA.
21. Karetnikov V. Tasks of developing the aquatory for testing autonomus ships in inland waterways / V. Karetnikov, E. Ol'khovik, G. Chistyakov // E3S Web of Conferences : Key Trends in Transportation Innovation, KTTI 2019, Khabarovsk, 24–26 октября 2019 года. Vol. 157. — Khabarovsk: EDP Sciences, 2020. — P. 02010. — EDN ZIGJLJ. — DOI: 10.1051/e3sconf/202015702010.
22. Development of methods for maneuvering trials of autonomous ships in test water area / V. Karetnikov, E. Ol'khovik, A. Butsanets, A. Ivanova // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2021. — Vol. 130 LNCE. — P. 40–46. — EDN PHCRQD. — DOI: 10.1007/978-981-33-6208-6_5.

REFERENCES

1. Cheng, T., B. Wu et al. "Analysis of human errors in human-autonomy collaboration in autonomous ships operations through shore control experimental data." *Reliability Engineering & System Safety* 246 (2024): 110080. DOI: 10.1016/j.ress.2024.110080.
2. Veitch, E. and O. A. Alsos. "A systematic review of human-AI interaction in autonomous ship systems." *Safety Science* 152 (2022): 105778. DOI: 10.1016/j.ssci.2022.105778.
3. Karetnikov, V., E. Ol'Khovik, A. Butsanets and A. Ivanova. "Simulation of Maneuvering Trials of an Unmanned or Autonomous Surface Ship on a Navigation Simulator." *Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020*. Springer Nature Singapore, 2021: 146–156. DOI: 10.1007/978-981-33-6208-6_15.
4. Zhou, X.-Y., Z.-J. Liu, F.-W. Wang and Z.-L. Wu. "A system-theoretic approach to safety and security co-analysis of autonomous ships." *Ocean Engineering* 222 (2021): 108569. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108569.
5. Smolentsev, S. V., A. V. Brylyakov, V. G. Senchenko and A. A. Butsanets. "Structural analysis of the system of autonomous ship navigation and mooring through state graphs ." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 79 (2025): 4–13.
6. Reutskiy, A. S., V. V. Yakimov and A. A. Butsanets. "Assessment of the impact of the type of marine fuel used on the carbon footprint of the transport service." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 76 (2024): 87–95.
7. Smolentsev, S. V., S. F. Shakhnov and A. A. Butsanets. "A list of equipment and overview of data transmission protocols for autonomous surface vessels." *Elektronnye informatsionnye sistemy* 4(39) (2023): 10–21.
8. Fan, S., K. Shi, J. Weng and Z. Yang. "Letting losses be lessons: Human-machine cooperation in maritime transport." *Reliability Engineering & System Safety* 253 (2025): 110547. DOI: 10.1016/j.ress.2024.110547.
9. Fan, S., X. Yan et al. "Incorporation of human factors into maritime accident analysis using a data-driven Bayesian network." *Reliability Engineering & System Safety* 203 (2020): 107070. DOI: 10.1016/j.ress.2020.107070.
10. Li, X., P. Oh, Y. Zhou and K. F. Yuen. "Operational risk identification of maritime surface autonomous ship: A network analysis approach." *Transport Policy* 130 (2023): 1–14. DOI: 10.1016/j.tranpol.2022.10.012.

11. Bolbot, V., B. Twomey et al. "A methodology to define risk matrices – Application to inland water ways autonomous ships." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 14 (2022): 100457. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2022.100457.
12. Liu, P., X. Dong and P. Wang. "An enhanced fuzzy cognitive map for human risk assessment in maritime transportation: Integrating causal mining and expert elicitation." *Advanced Engineering Informatics* 68 (2025): 103624. DOI: 10.1016/j.aei.2025.103624.
13. Granovskiy, E. A. "Problems of risk assessment based on the results of the hazop study." *Occupational Safety in Industry* 5 (2023): 33–40. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-5-33-40.
14. Lisanov, M. V., A. A. Agapov, S. Kh. Zaynetdinov et al. "Updating safety guides in the field of accident risk assessment at the production facilities." *Occupational Safety in Industry* 7 (2023): 85–92. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-7-85-92.
15. Aleshkov, D. S., N. Yu. Ayupova, E. V. Bakiko et al. "Considering human factor impact on professional risks when using the fault tree method." *Occupational Safety in Industry* 10 (2025): 32–38. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-10-32-38.
16. Mel'nik, P. B. "Metodika formirovaniya ekspertnykh pulov i grupp dlya provedeniya ekspertno-analiticheskikh issledovaniy ." *Innovatics and Expert Examination* 1(19) (2017): 39–54.
17. Putivtseva, N. P., T. V. Zaytseva, O. P. Pusnaya et al. "Razrabotka programmnoy podderzhki ierarkhicheskoy mnogokriterial'noy protsedury otsenki kachestva ekspertov ." *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika* 16(237) (2016): 172–179.
18. Putivtseva, N. P., S. V. Igrunova, E. Yu. Beketova and S. A. Kapitan. "Razrabotka ierarkhicheskoy mnogokriterial'noy protsedury otsenki kachestva ekspertov ." *Research Result. Information Technologies* 1.1 (2016): 39–47. DOI: 10.18413/2518-1092-2016-1-1-39-47.
19. Burylin, Ya. V., S. S. Zhuk and A. A. Butsanets. "Model of the life cycle of an automated tugboat in the system of autonomous ship guiding and mooring in a seaport." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 17.5 (2025): 717–727. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-717-727.
20. Ayzinov, S. D., A. A. Butsanets, S. V. Smolentsev et al. "Principles for assessing the functional properties of systems for autonomous shipping." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 74 (2024): 83–96.
21. Karetnikov, V. et al. "Tasks of developing the aquatory for testing autonomus ships in inland waterways." *E3S Web Conf.* 157 (2020): 02010. DOI: 10.1051/e3sconf/202015702010.
22. Karetnikov, V., E. Ol'khovik, A. Butsanets and A. Ivanova. "Development of Methods for Maneuvering Trials of Autonomous Ships in Test Water Area." *Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020*. Springer Nature Singapore, 2021: 40–46. DOI: 10.1007/978-981-33-6208-6_5.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Семенов Василий Викторович —
 соискатель на степень кандидата наук
 кафедра судоходства на внутренних водных путях
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация,
 Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: kaf_svpv@gumrf.ru

Каретников Владимир Владимирович —
 доктор технических наук, профессор
 Государственный университет морского
 и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
 198035, Российская Федерация,
 Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: karetnikov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Semenov, Vasily V. —
 Department of Navigation
 on Inland Waterways
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
 5/7, Dvinskaya str., St. Petersburg,
 198035, Russian Federation
 email: kaf_svpv@gumrf.ru

Karetnikov, Vladimir V. —
 Doctor of Technical Sciences, Professor
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
 5/7, Dvinskaya str., St. Petersburg,
 198035, Russian Federation
 e-mail: karetnikov@yandex.ru

Буцанец Артем Александрович —
кандидат технических наук
Государственный университет морского и речного
флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

Butsanets, Artem A. —
Candidate of Technical Sciences
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7, Dvinskaya str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 18 мая 2026 г.

Received: May 18, 2026.

АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАЧКИ СУДНА ПО ДАННЫМ, ПОЛУЧЕННЫМ В РЕЙСЕ

В. И. Сичкарев, В. П. Умрихин, М. Д. Тарасенко

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»,
Новосибирск, Российская Федерация.

Исследован метод экспериментального определения амплитудно-частотной характеристики бортовой качки судна непосредственно в условиях эксплуатационного рейса, ориентированный на фактическую рейсовую загрузку, состояние судна и реальное гидрометеорологическое окружение. Методологическую основу составляют три последовательных этапа: приборная регистрация и спектральная обработка записи качки с коррекцией на средний ветровой крен; получение суммарного спектра волнения путем объединения данных, полученных при помощи обработки радиолокационного снимка с низкочастотной зыбью, детектируемой через частотный инвариант качки и соотносимой с удаленными циклоническими системами, информация о которых может быть получена из синоптических карт; расчет амплитудно-частотной характеристики по соотношению спектров качки и волнения с последующим обобщением частных характеристик для разных курсовых углов. Апробация метода выполнена по данным рейса судна проекта «Сокол» у побережья Камчатки в условиях значительного волнения при наличии нескольких волновых систем, включая детектированную зыбь тропического циклона. Полученные для трех курсовых углов частные амплитудно-частотные характеристики обнаруживают инвариантность частотного положения максимумов при существенном различии их амплитудных значений, что указывает на высокую чувствительность метода к точности аппроксимационных процедур. Предложенная процедура среднеарифметического осреднения амплитудно-частотной характеристики по совокупности курсовых углов продемонстрировала состоятельность при верификационном прогнозировании качки: частотный состав воспроизводится адекватно, расхождения прогнозных и фактических амплитуд не превышают трех градусов, значительно уступая разбросу максимумов частных амплитудно-частотных характеристик. Обсуждаются альтернативные способы обобщения (покурсовые экстремумы, средневзвешенные оценки) и намечены задачи снижения зависимости результатов от параметров аппроксимации спектров как приоритетное направление совершенствования метода.

Ключевые слова: движущееся судно, спектр качки, детектирование низких частот, судно как детектор, суперпозиция частных спектров, истинный спектр волнения, курсовой угол волнения, скорость судна, кажущийся спектр волнения, амплитудно-частотная характеристика, обобщение характеристик, проверка расчетом качки.

Для цитирования:

Сичкарев, В. И. Амплитудно-частотная характеристика качки судна по данным, полученным в рейсе / В. И. Сичкарев, В. П. Умрихин, М. Д. Тарасенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 4. С. 650–663. EDN TZVYXZ. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-650-663.

AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTIC OF SHIP ROLLING BASED ON DATA OBTAINED DURING A VOYAGE

V. I. Sichkarev, V. P. Umrikhin, M. D. Tarasenko

Siberian State University of the Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation.

A method for the experimental determination of the amplitude-frequency characteristic of ship rolling directly during an operational voyage is presented, taking into account the actual voyage loading condition, vessel condition, and actual hydrometeorological environment. The methodological basis comprises three successive stages: instrumental recording and spectral processing of the roll record with correction for the mean wind-induced heel; obtaining the total wave spectrum by combining data obtained from radar image processing with low-frequency

swell detected through the frequency invariant of rolling and associated with remote cyclonic systems, information on which can be obtained from synoptic charts; and calculation of the amplitude-frequency characteristic from the ratio of the roll and wave spectra, followed by generalization of partial characteristics for different heading angles. The method was tested using voyage data from a vessel of the Sokol design off the coast of Kamchatka under significant wave conditions with several wave systems, including detected swell from a tropical cyclone. The partial amplitude-frequency characteristics obtained for three heading angles show invariance in the frequency positions of their maxima despite substantial differences in their amplitude values, indicating the high sensitivity of the method to the accuracy of approximation procedures. The proposed procedure for arithmetic averaging of the amplitude-frequency characteristic over a set of heading angles proved valid in verification roll prediction: the frequency composition is reproduced adequately, while the differences between predicted and actual amplitudes do not exceed three degrees and are considerably smaller than the scatter of the maxima of the partial amplitude-frequency characteristics. Alternative generalization methods, including heading-specific extrema and weighted-average estimates, are discussed, and reducing the dependence of the results on spectral approximation parameters is identified as a priority for further improvement of the method.

Keywords: moving vessel, roll spectrum, low-frequency detection, vessel as a detector, superposition of partial spectra, true wave spectrum, wave heading angle, vessel speed, encounter wave spectrum, amplitude-frequency characteristic, generalization of characteristics, verification by roll calculation.

For citation:

Sichkarev, Viktor I., V. P. Umrikhin and M. D. Tarasenko. "Amplitude-frequency characteristic of ship rolling based on data obtained during a voyage" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.4 (2026): 650–663. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-650-663.

Введение (Introduction)

Плавание на значительном и штормовом волнении остается одной из сложных задач судовождения, требующих для своего решения на современном уровне привлечения научных методов не только судоводительских, но и смежных наук. Среди них применение спектральных методов качки, основная проблема использования которых состоит в значительной изменчивости состояния судна при разной загрузке судна. Решение этой проблемы можно искать путем получения амплитудно-частотной характеристики качки судна непосредственно в текущем рейсе с конкретной загрузкой судна. Для этого необходимо выполнить регистрацию качки судна с получением на ее основе спектра качки и одновременно каким-либо способом получить спектр действующего волнения. Работа по записи качки и регистрации волнения на экране судовой РЛС была выполнена на судне «Селенга» в одном из грузовых рейсов у побережья Камчатки в 2024 г. в условиях значительного волнения, дальнейшая обработка — на берегу в лабораторных условиях СГУВТ.

В исследовании [1] получены средние интервальные распределения амплитуд бортовой качки при движении судна на трех курсах, выявлены разнонаправленные волновые системы приближающегося циклона, обнаружено присутствие волнения, возникшего в зоне тропического циклона Т2410. Предложено воспользоваться методом суперпозиции частных спектров с весовыми коэффициентами [2].

Стремительно растущие объемы грузоперевозок по морю ставят перед судоводителями новые задачи: груз должен быть доставлен как можно быстрее, в целости и сохранности. В свою очередь, с объемами перевозок коррелируют также задачи повышения уровня безопасности мореплавания. Решение вопросов безопасности штормового плавания судов на сегодняшний день стоит достаточно остро. В исследованиях [3, 4] приводятся некоторые сведения об аварийности судов, в том числе связанной с попаданием в штормовые условия плавания. В связи с этим особенно интересен отчет [5], в котором прослеживается четкая зависимость увеличения числа потертанных контейнеров с изменением маршрутов плавания контейнеровозов из Красного моря в сторону мыса Доброй Надежды. Как известно, этот район является сложным по причине штормовых условий.

Ориентируясь на показатели аварийности, можно сделать вывод о недостаточной информационной и инструментальной [6] обеспеченности судоводителей, совершающих переходы

в штормовых условиях, и существует необходимость в новом методе, который оперирует основным параметром качки — ее амплитудой.

Целью статьи является получение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) бортовой качки судна непосредственно в условиях эксплуатационного рейса на основе совместной обработки натурной записи качки и гидрометеорологической информации о волнении, обеспечивающей возможность прогнозирования качки с учетом фактической загрузки и реального гидрометеорологического окружения. Методология описана в [7] и опробована в [8–10].

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать необходимость коррекции записи качки на величину среднего ветрового крена для корректного выделения колебательной составляющей и последующего вычисления частот качки.
2. Получить частные АЧХ бортовой качки для различных курсовых углов судна относительно волнения по соотношению спектров качки и волнения.
3. Выполнить сравнительный анализ частных АЧХ и предложить способ их обобщения, рассмотрев процедуру среднеарифметического осреднения по всем частотам.
4. Провести верификацию осредненной АЧХ путем прогностического расчета качки на исходных спектрах кажущегося волнения и сопоставления прогнозных амплитуд с фактическими данными.
5. Выявить факторы, влияющие на точность метода и определить направления дальнейших исследований по его совершенствованию.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Вопрос получения АЧХ связан с определением параметров качки судна, которые в свою очередь определяются статистиками амплитуд качки и частот качки. Частоты качки определяются частотами вынуждающего процесса, т. е. кажущимися частотами волнения. Это свойство осцилляторов применимо и наоборот: от частот качки судна к кажущимся частотам волнения, однако при этом необходимо понимать также сущность судна как объекта, находящегося на границе двух сред и подверженного воздействию каждой из них.

Плавание судна в ветроволновом поле приводит к появлению крена судна под воздействием ветрового поля на надводную часть судна и к колебательному процессу качки судна относительно некоторого равновесного положения под действием волнения как вынуждающего колебательного процесса. Поскольку колебательный процесс качки происходит относительно равновесного наклоненного положения судна, достоверной информацией о периодах качки является определение периодов относительно не прямого, положения судна, а его равновесного наклоненного положения. Следовательно, качку в ветроволновых условиях на гармонической волне следует представить в виде

$$\vartheta = \eta + \theta \cdot \sin(\Omega t + \delta), \quad (1)$$

где ϑ — мгновенное значение угла крена;

θ — амплитуда колебательного процесса качки;

η — осредненное положение равновесного крена судна под действием ветра;

Ω — частота качки, равная кажущейся частоте волнения;

t — текущее время;

δ — сдвиг по фазе колебаний судна относительно волновых колебаний.

Таким образом, для оценки предельно допустимых амплитуд качки по условиям остойчивости необходимо к амплитудам качки добавлять угол среднего ветрового крена η , а для расчета периодов качки из исходной записи качки следует определить этот угол, а затем вычесть его из всех мгновенных углов крена в записи качки, после чего вычислять полупериоды и частоты качки.

Результаты (Results)

На курсе 242° распределение средних интервальных амплитуд качки относительно нулевого крена представлено на рис. 1, а, относительно среднего крена η — на рис. 1, б, сравнение двух этих распределений качки — на рис. 1, в.

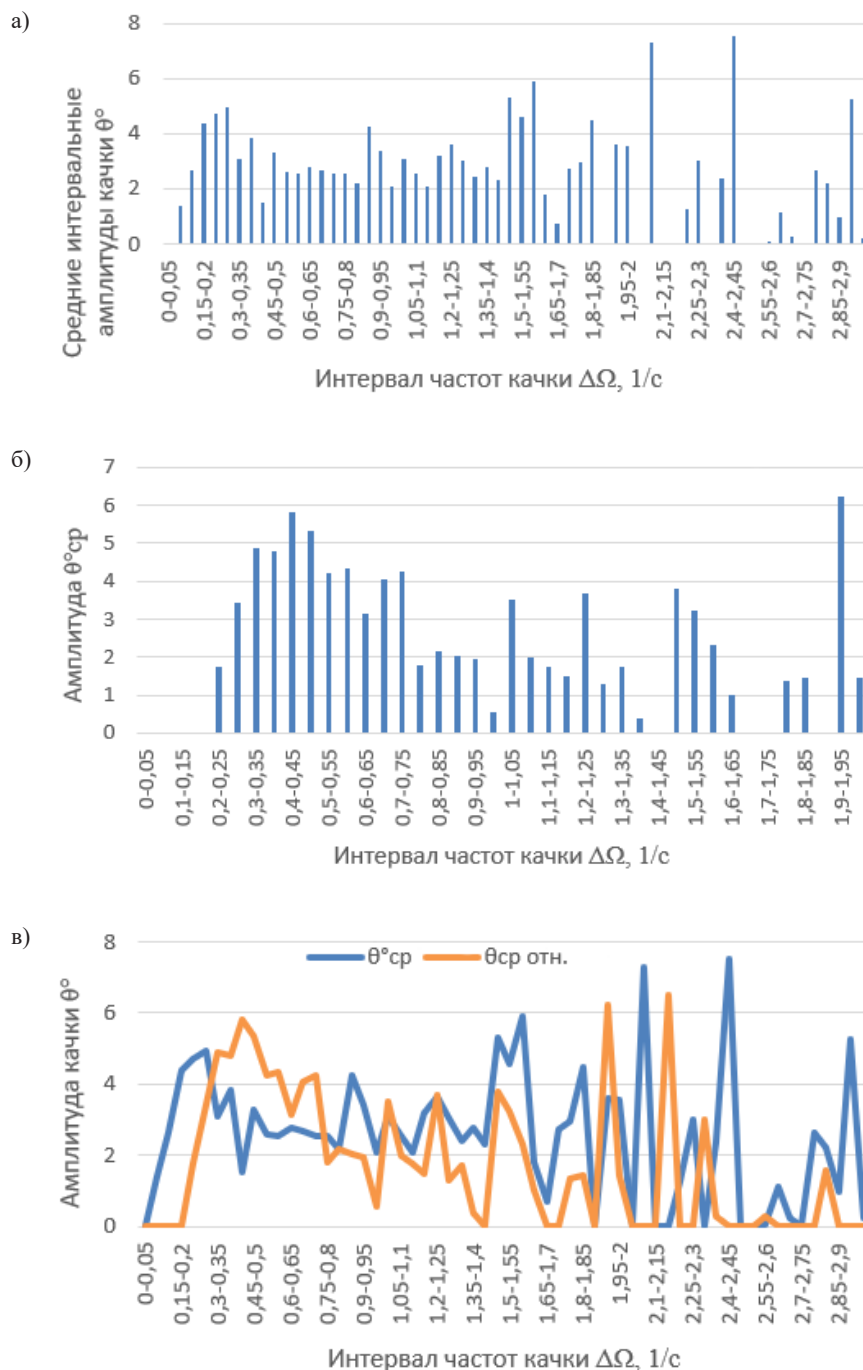


Рис. 1. Распределение амплитуд качки:
а — относительно нулевого крена на курсе 242° ;
б — относительно среднего крена η на курсе 242° ;
в — сравнение распределений амплитуд качки относительно нулевого и среднего крена η на курсе 242°

Fig. 1. Distribution of Roll Amplitudes:
а — Relative to Zero Heel at a Heading of 242° ;
б — Relative to Mean Heel η at a Heading of 242° ;
с — Comparison of Roll Amplitude Distributions Relative to Zero and Mean Heel η at a Heading of 242°

Сравнение распределений амплитуд качки показывает некоторое увеличение амплитуд качки в основной низкочастотной части распределения при учете среднего крена, а также увеличение минимальной зарегистрированной частоты качки. На рис. 2 приведена аппроксимация интервального распределения амплитуд относительно среднего крена η на курсе 242° функцией

$$\theta_{\text{ср}} = \frac{1,6}{(\Omega + 0,05)^{2,5}} \exp\left(-\frac{0,07}{\Omega^{2,5}}\right). \quad (2)$$

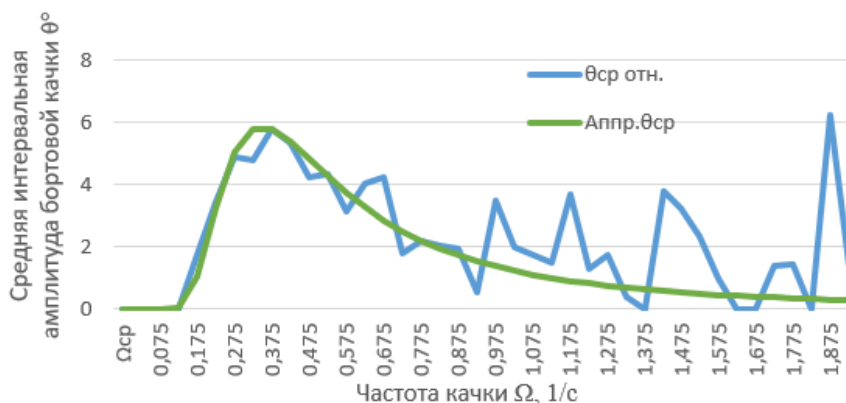


Рис. 2. Вид аппроксимации распределения амплитуд качки относительно среднего крена η по формуле (2)

Fig. 2. Approximation of the Roll Amplitude Distribution Relative to Mean Heel η According to Eq. (2)

О достоверности значений интервального распределения амплитуд качки можно судить по повторяемости этих значений относительно среднего угла крена η на курсе 242° (рис. 3).

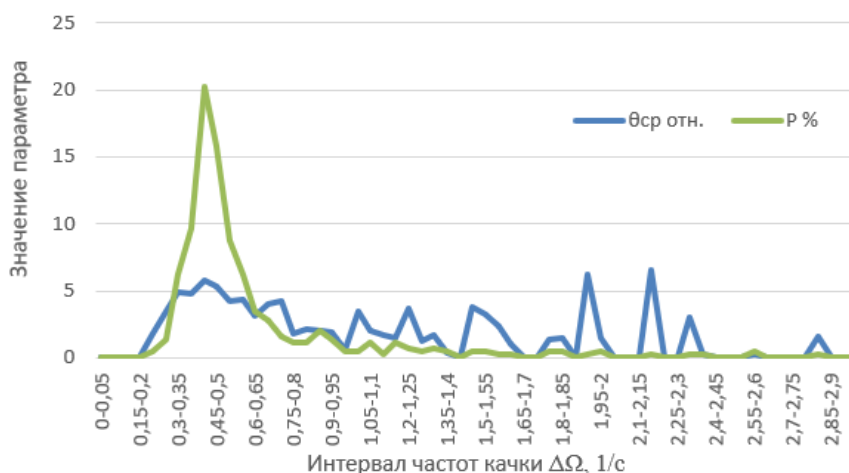


Рис. 3. Повторяемость значений амплитуд по интервалам $\Delta\Omega$

Fig. 3. Occurrence Frequency of Amplitude Values over $\Delta\Omega$ Intervals

Эти значения повторяемости относятся также и к другим элементам распределения, в том числе представленному на рис. 4 к коэффициенту k отношения максимальных амплитуд к средним по интервалам:

$$k = \frac{\theta_m}{\theta_{\text{ср}}}. \quad (3)$$



Рис. 4. Коэффициент k превышения средних интервальных амплитуд качки
Fig. 4. Coefficient k of Exceedance over Mean Interval Roll Amplitudes

В целом значения коэффициента превышения, имеющие убедительную повторяемость более 5 %, не превышают значений 2,4, однако, в трех интервалах они значительно выше. Так, при повторяемости $k = 3,1$ в интервале частот $\Omega = 0,50 - 0,55$ 1/с $P = 8,7$ %; при $k = 2,7$ в интервале частот $\Omega = 0,70 - 0,75$ 1/с — $P = 1,61$ %, при $k = 3,5$ в интервале частот $\Omega = 0,80 - 0,85$ 1/с — $P = 1,2$ %. Это важное обстоятельство нуждается в дополнительных исследованиях.

На основе распределения амплитуд качки в низкочастотном диапазоне от $\Omega = 0,15 - 0,20$ 1/с и соответствующего этому диапазону значения суммарного спектра волнения становится очевидной недостаточность учтенного волнения на основе обработки радиолокационного изображения волнового поля и необходимость учета трансформированной нелинейным взаимодействием зыби, исходящей из зоны генерации тропического циклона Т2410, при котором возможно появление волн очень низких частот. Так как параметры низкочастотного волнения гидрометеорологическими методами установить не удастся, предложено за основу назначения частот волнения принять частоты качки судна, поскольку судно в данном случае выступает объективным индикатором наличия такого волнения: судно как осциллятор раскачивается с вынужденными частотами волнового процесса.

Далее можно принять, что высоты волн за время движения из зоны генерации тропического циклона снизились, а форма спектра этой зыби для принятой кажущейся частоты максимума спектра $\Omega = 0,15$ 1/с соответствует определенному д-ром географ. наук И. Н. Давиданом аналитическому выражению [2]:

$$S_3 = 6 \frac{m_0}{\omega} \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^5 \exp \left[-1,2 \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^5 \right] = \frac{0,000642}{\omega^6} \exp \left(-\frac{0,000091}{\omega^5} \right). \quad (4)$$

Пересчет истинных частот волнения ω в кажущиеся частоты Ω можно выполнить по формуле

$$\Omega = \omega \left(1 + \omega \frac{V}{g} \cos q \right).$$

Суммарный спектр кажущегося волнения $S_{\zeta_{анпр}}$, определенный обработкой радиолокационного изображения волнения вместе со спектром зыби тропического циклона Т2410, аппроксимирован выражением

$$S_{\zeta_{анпр}} = \frac{0,000125}{\Omega^4} \exp \left(-\frac{0,005}{\Omega^{3,5}} \right) + \frac{1,35}{\Omega^{3,25}} \exp \left(-\frac{1}{\Omega^2} \right), \quad (5)$$

и показан на рис. 5.

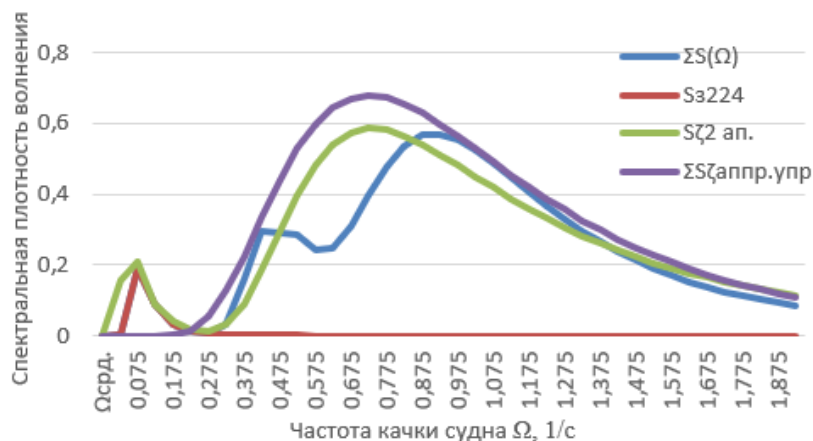


Рис. 5. Суммарный спектр кажущегося волнения и его аппроксимация
Fig. 5. Total Encounter Wave Spectrum and Its Approximation

С учетом суммарного спектра кажущегося волнения и добавочного низкочастотного спектра от тропического циклона представляется возможным рассчитать АЧХ бортовой качки судна по методу Хинчина – Винера:

$$\Phi^2(\Omega) = \frac{S_\theta(\Omega)}{S_\zeta(\Omega)}; \quad \Phi(\Omega) = \frac{\theta(\Omega)}{\sqrt{2S_\zeta(\Omega)}}, \quad (6)$$

где $\Phi(\Omega)$ — АЧХ бортовой качки;

$S_\theta(\Omega)$ — спектр качки судна;

$\theta(\Omega)$ — амплитуда качки на частоте Ω ;

$S_\zeta(\Omega)$ — итоговый спектр волнения.

АЧХ, полученная на курсе 242°, представлена на рис. 6.

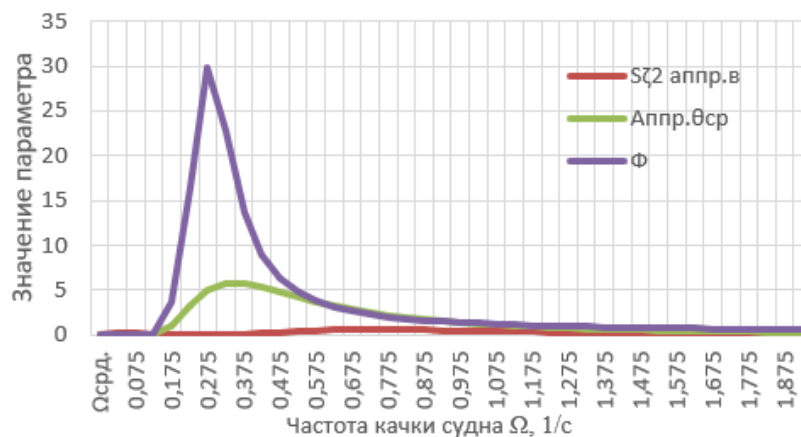


Рис. 6. АЧХ бортовой качки, полученная на курсе 242°

Fig. 6. Amplitude-Frequency Characteristic of Roll Obtained at a Heading of 242

Аналогичную работу по получению спектра качки и его аппроксимации, по аппроксимации спектра суммарного волнения с учетом низкочастотной зыби после их преобразования из истинных частот в кажущиеся, по расчету АЧХ можно выполнить также на курсах судна 270° и 330°. На курсе 270° получены следующие результаты:

– распределение средних амплитуд качки и его аппроксимация по частотам качки (рис. 7, а):

$$\theta_{\text{ср.аппр}} = \frac{0,095}{\Omega^{6,5}} \exp\left(-\frac{0,12}{\Omega^3}\right); \quad (7)$$

– повторяемость коэффициента k превышения средней интервальной амплитуды качки (рис. 7, б);

– спектр суммарного кажущегося волнения и его аппроксимация определяются на рис. 7, в согласно выражению

$$S_{\zeta_{\text{аппр2}}} = \frac{2,75}{\Omega^{3,1}} \exp\left(-\frac{1,8}{\Omega^{1,2}}\right); \quad (8)$$

– АЧХ на курсе 270° (рис. 7, з, д).

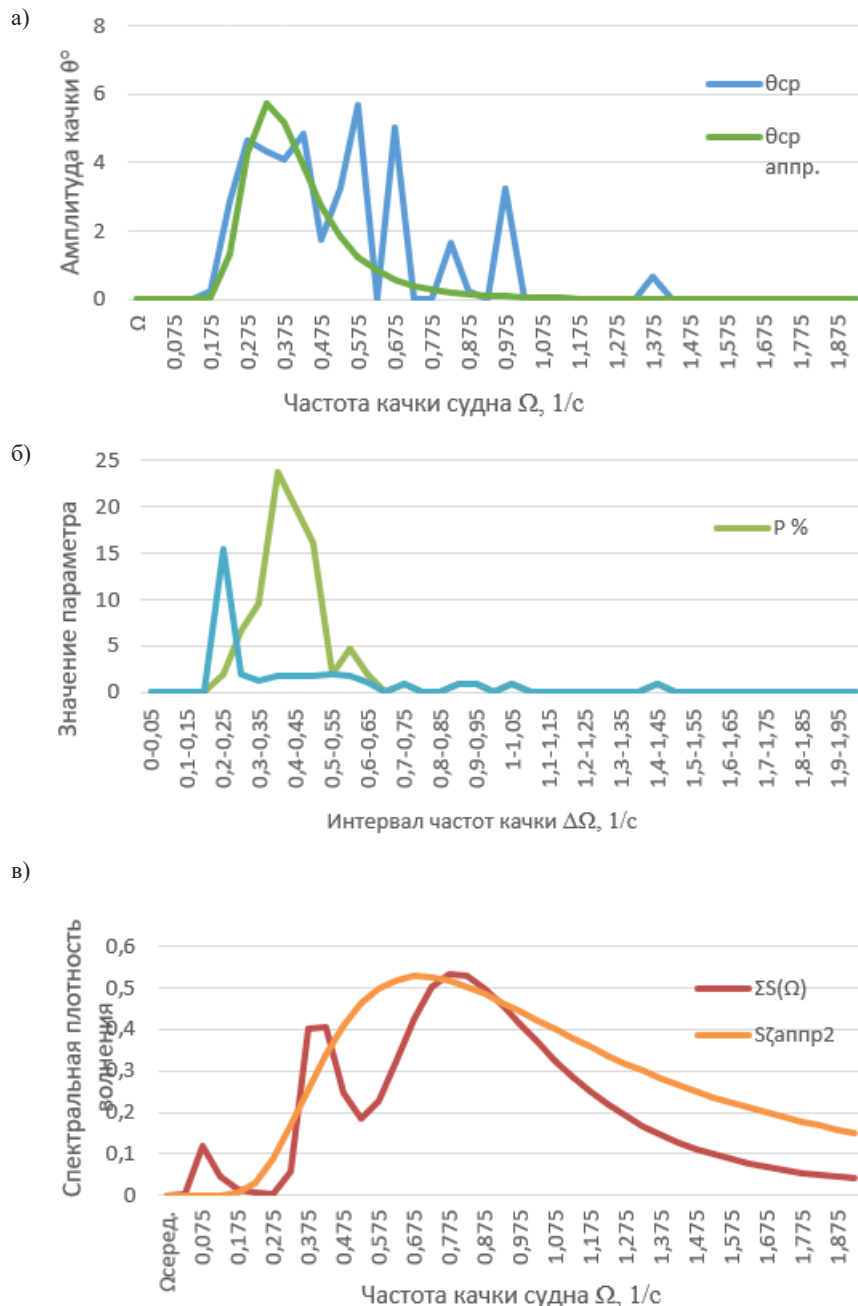


Рис. 7. (Начало). Результаты расчета качки на курсе 270°:

а — распределение средних интервальных амплитуд качки;

б — повторяемость коэффициента k превышения средних амплитуд;

в — спектр суммарного кажущегося волнения и его аппроксимация

Fig. 7. (Beginning). Roll Calculation Results at a Heading of 270°:

а — Distribution of Mean Interval Roll Amplitudes;

б — Occurrence Frequency of Coefficient k of Exceedance over Mean Amplitudes; в — Total Encounter Wave Spectrum and Its Approximation

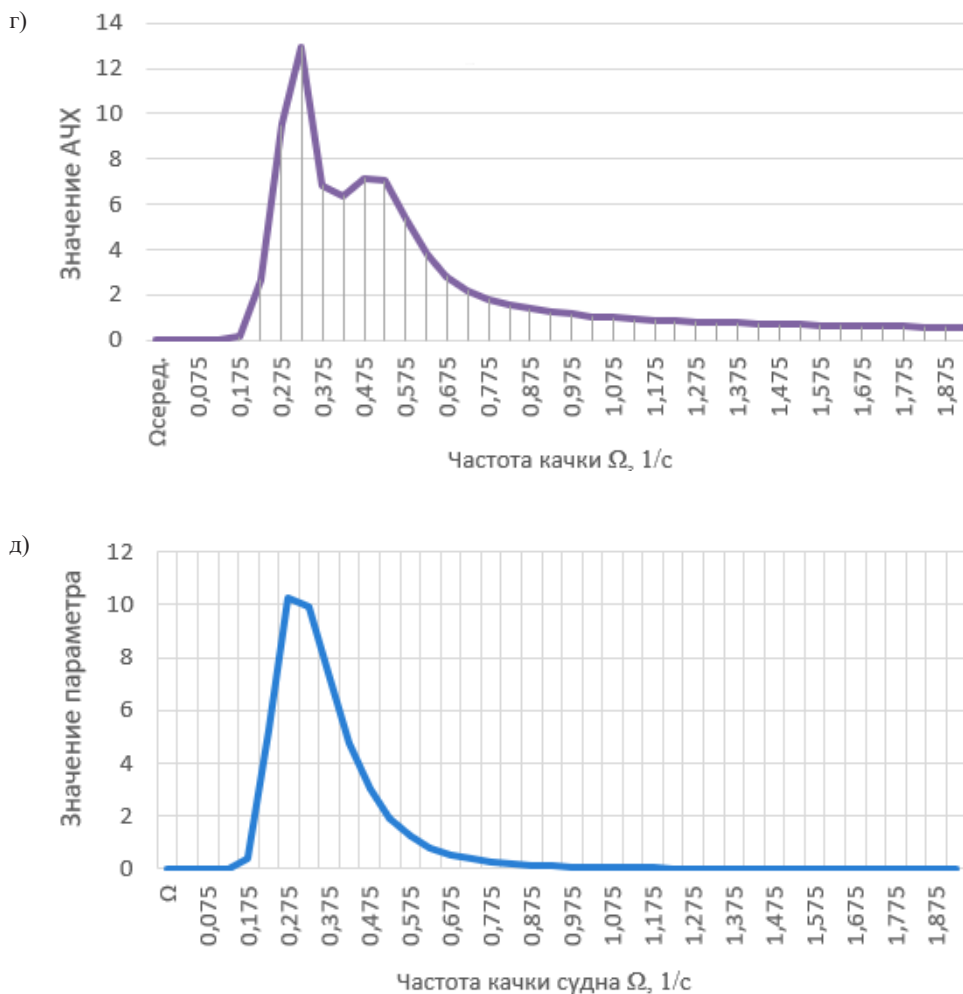


Рис. 7. (Окончание). Результаты расчета качки на курсе 270°:

z — амплитудно-частотная характеристика бортовой качки судна на курсе 270°, полученная без аппроксимации суммарного спектра волнения;

d — амплитудно-частотная характеристика бортовой качки по аппроксимациям качки и волнения

Fig. 7. (End). Roll Calculation Results at a Heading of 270°:

d — Amplitude-Frequency Characteristic of Ship Roll at a Heading of 270° Obtained without Approximation of the Total Wave Spectrum;

e — Amplitude-Frequency Characteristic of Roll Based on Approximations of Rolling and Waves

На курсе 330° получены следующие результаты:

– распределение средних интервальных амплитуд качки и его аппроксимация по частотам качки (рис. 8, а):

$$\theta_{\text{анпр}} = \frac{1,4}{\Omega^3} \exp\left(-\frac{0,036}{\Omega^{3,85}}\right) + \frac{0,00025}{\Omega^6} \exp\left(-\frac{0,000054}{\Omega^{5,5}}\right); \quad (8)$$

- повторяемость основных параметров качки (рис. 8, б);
- спектр суммарного кажущегося волнения (рис. 8, в);
- АЧХ на курсе 330° (рис. 8, г).

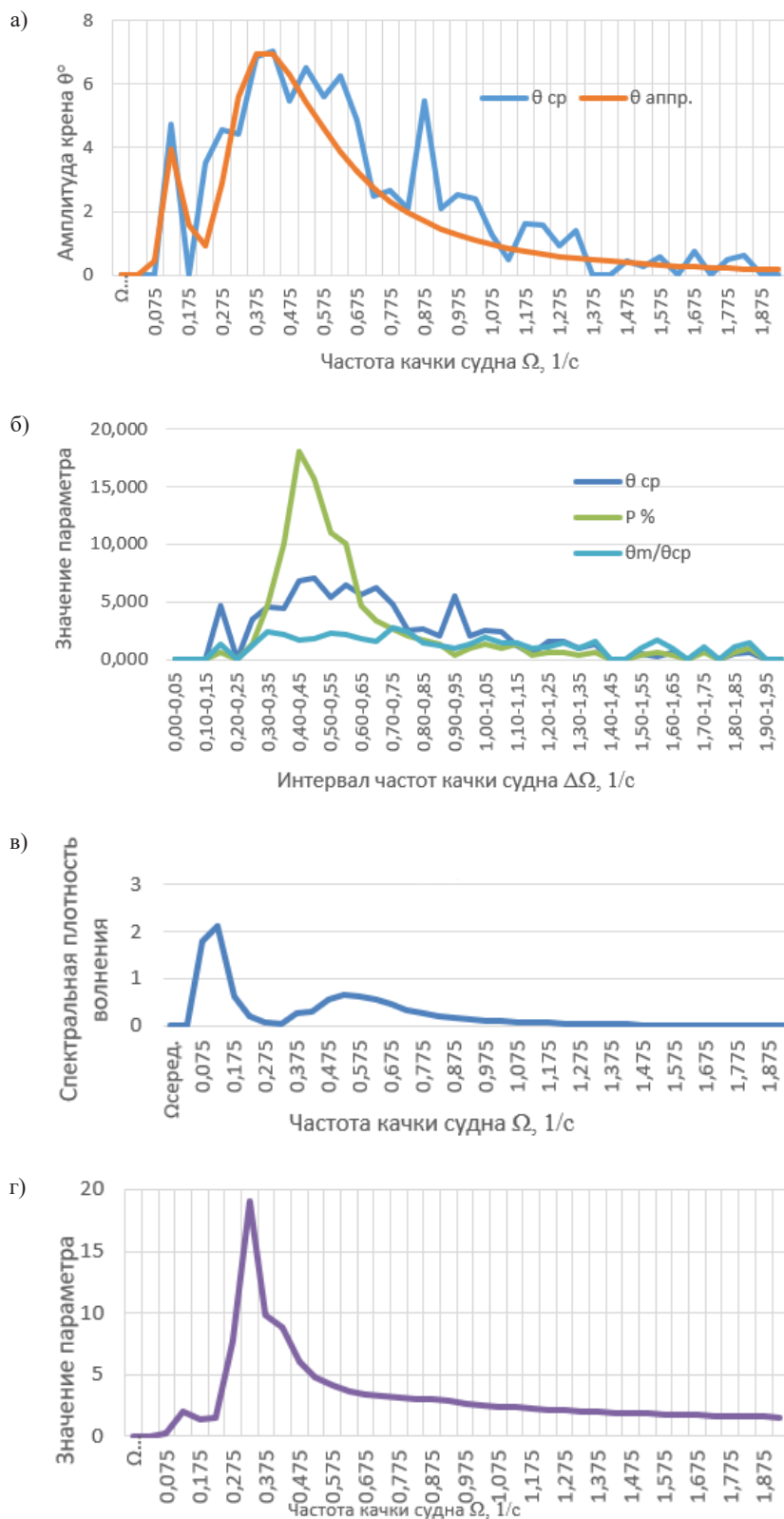


Рис. 8. Результаты расчета качки на курсе 330°:

- a* — распределение средних интервальных амплитуд качки и его аппроксимация;
b — повторяемость основных параметров волнения;
c — спектр суммарного кажущегося волнения; *d* — АЧХ бортовой качки судна

Fig. 8. Roll Calculation Results at a Heading of 330°:

- a* — Distribution of Mean Interval Roll Amplitudes and Its Approximation;
b — Occurrence Frequency of the Main Wave Parameters;
c — Total Encounter Wave Spectrum; *d* — Amplitude-Frequency Characteristic of Ship Roll

Таким образом, сформирована технологическая цепочка операций над параметрами истинного волнения частных волновых систем, которая позволяет получить параметры кажущегося волнения от каждого синоптического генератора волн, а затем объединить спектры кажущегося волнения методом суперпозиции. С помощью этого приема удастся получить АЧХ бортовой качки судна на каждом частном курсе судна.

Обсуждение (Discussion)

Рассмотренным методом на трех курсах судна получены различающиеся АЧХ бортовой качки. Частоты максимумов частных АЧХ довольно близки между собой и лежат в пределах $0,275 - 0,325$ 1/с. При этом частота максимума АЧХ на курсе 242° , на котором скорость судна была выше, чем на остальных курсах (13,4 уз по сравнению с 10 уз на остальных курсах), оказалась наиболее низкой.

Более значительным оказался разброс максимальных значений АЧХ: от 10 до 30. При этом самое большое значение АЧХ также оказалось на курсе 242° . По-видимому, на величину максимумов АЧХ значительно большее влияние оказывает точность аппроксимации суммарных спектров волнения и распределений амплитуд качки. Высокая зависимость значений АЧХ от параметров аппроксимации представляется отрицательным свойством разрабатываемого метода определения АЧХ в рейсе, требующим дополнительных поисков для снижения этой зависимости.

Полученные различающиеся зависимости АЧХ от курсов судна можно проверить на возможность обобщения. Представляется возможным их объединение в более общую информацию о качке судна в широких пределах частот. Объединение может базироваться на разных подходах: например, на среднем арифметическом, на максимальном или минимальном значении по каждой частоте, на среднем квадратическом, среднем взвешенном, а также на других принципах. Различные варианты также потребуют проведения дополнительных исследований для выявления наилучших способов обобщения.

Очевидно, что правильность подхода к обобщению АЧХ качки должна быть проверена расчетом качки с полученной обобщенной АЧХ и сравнением расчета с реальной качкой. Для этого может быть использован прогностический расчет качки на том же волнении, на котором получены АЧХ.

Рассмотрим обобщение в виде среднего арифметического значения частных АЧХ (рис. 9)

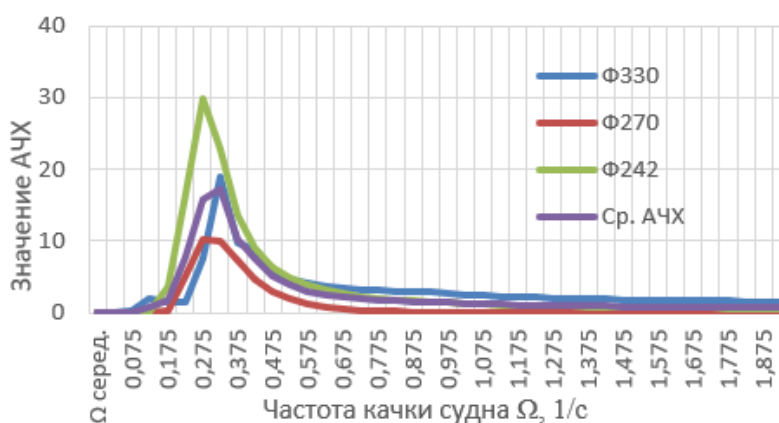
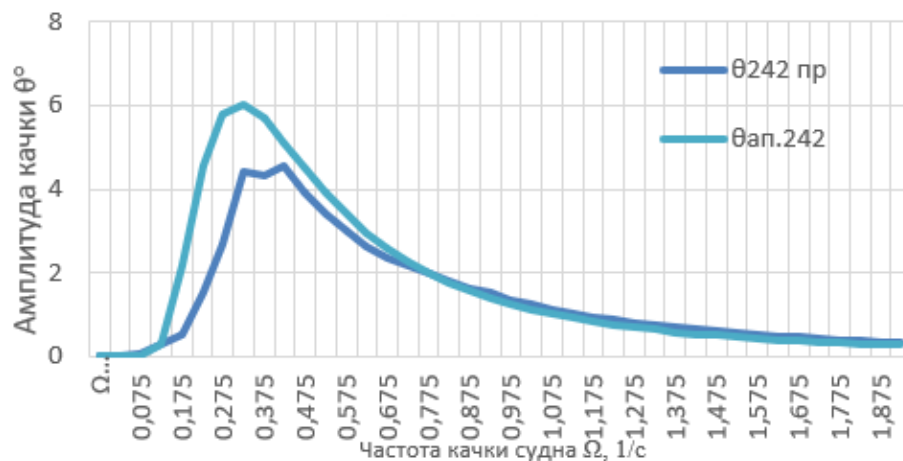


Рис. 9. Сравнение полученных АЧХ бортовой качки $\Phi(\Omega)$ на курсах судна 242° , 270° , 330° и их обобщение в виде среднего арифметического

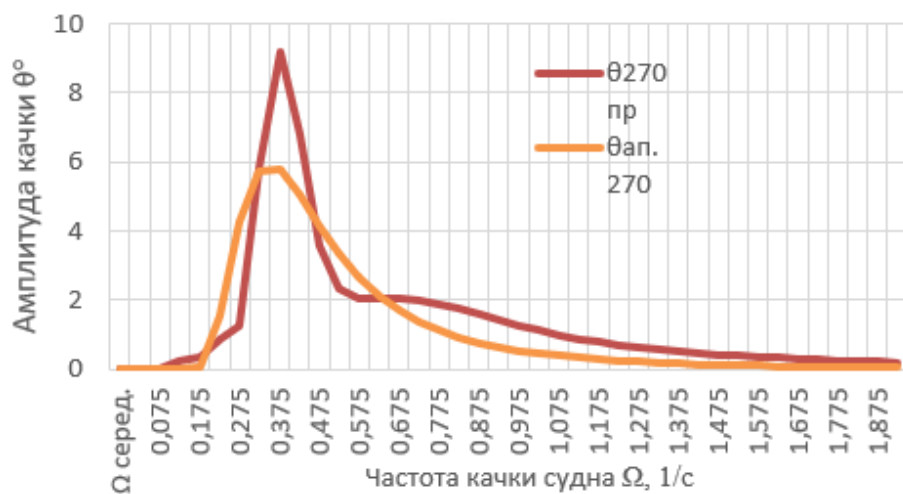
Fig. 9. Comparison of the Obtained Roll Amplitude-Frequency Characteristics $\Phi(\Omega)$ at Ship Headings of 242° , 270° , and 330° and Their Generalization as an Arithmetic Mean

и сопоставительный проверочный расчет прогнозируемой качки на кажущемся волнении каждого курса с реальной качкой, использованной для получения АЧХ на этом курсе судна (рис. 10).

а)



б)



в)

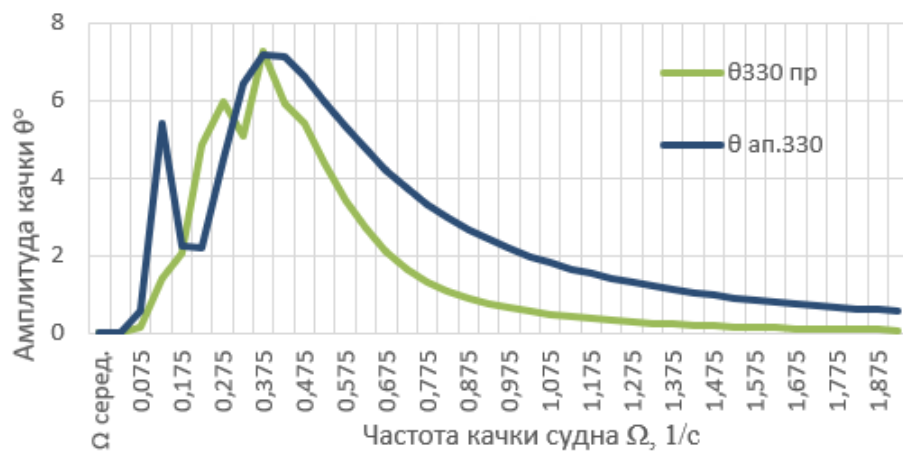


Рис. 10. Сравнение прогнозируемых значений качки с реальными:

а — на кажущемся волнении курса 242°; б — на кажущемся волнении курса 270°;
в — на кажущемся волнении курса 330°

Fig. 10. Comparison of Predicted and Actual Roll Values:

а — under Encounter Wave Conditions at a Heading of 242°; б — at a Heading of 270°;
с — at a Heading of 330°

Сравнение расчетных прогнозных амплитуд показывает, что различие в расчетных амплитудах по осредненной АЧХ оказывается несколько меньшим, чем различие их частных АЧХ. Так, на курсе 242° максимальные прогнозные амплитуды оказались на $1,5^\circ$ меньше реальных; на курсе 270° — на 3° больше, а на курсе 330° максимальные расчетные и фактические амплитуды практически совпадают.

Заключение (Conclusion)

По результатам сопоставления можно сделать следующие выводы:

- частотный состав прогнозируемой качки адекватен реальной качке;
- амплитуды качки вне зоны максимума приблизительно соответствуют реальной качке, хоть и не представляют интереса для оценки безопасности плавания.

Таким образом, предложен метод получения АЧХ качки судна непосредственно в рейсе по регистрации качки и оценке волнения по радиолокационному изображению волнового поля с учетом аналитической гидрометеорологической информации. Обобщенная среднеарифметическая АЧХ, сохраняющая особенности частных АЧХ на разных курсовых углах волнения, способна давать прогноз качки, адекватный по частотному диапазону с некоторым искажением величин амплитуд в большую или меньшую сторону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сичкарёв В. И. Идентификация волновых условий по спектру качки судна / В. И. Сичкарёв, В. П. Умрихин, М. Д. Тарасенко // Транспортное дело России. — 2024. — № 7. — С. 156–161. — EDN LXNWHV.
2. Давидан И. Н. Ветровое волнение как вероятностный гидродинамический процесс / И. Н. Давидан, Л. И. Лопатухин, В. А. Рожков. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 288 с.
3. Царик Р. С. Оценка влияния метacentрической высоты контейнеровоза на формирование условий, способствующих возникновению параметрической бортовой качки / Р. С. Царик // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 359–371. — EDN CMRDPQ. — DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-359-371.
4. Царик Р. С. Комплексный подход к безопасности морских контейнерных перевозок / Р. С. Царик // Мир транспорта. — 2016. — Т. 14. — № 3(64). — С. 212–231. — EDN XXJQPX.
5. Containers Lost at Sea — 2025 Report [Электронный ресурс] // World Shipping Council : [сайт]. — URL: <https://www.worldshipping.org/containers-lost-at-sea> (дата обращения: 09.05.2026).
6. Тарасенко М. Д. Обзор судоводительского инструментария оценки качки судна / М. Д. Тарасенко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2024. — № 1. — С. 123–131. — EDN HFPDFQ.
7. Патент № 2813122 Российская Федерация, МПК G06Q 10/04 (2012.01); G08G 99/00 (2006.01); B63B 39/14 (2006.01). Способ контроля и обеспечения безопасности штормового плавания судна. Заявка № 2023124660 от 26.09.2023. Опубл. 06.02.2024, бюлл. № 4 / Сичкарёв В. И., Умрихин В. П., Палагушкин Б. В; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Сибирский государственный университет водного транспорта. — 12 с.
8. Сичкарёв В. И. Теоретические основы штормового плавания / В. И. Сичкарёв, В. П. Умрихин, А. Г. Поминов [и др.] : монография. — Новосибирск: СГУВТ, 2021. — 210 с.
9. Sichkarev V. I. Recording of the ship's motion in operation on irregular waves and its processing / V. I. Sichkarev, V. P. Umrikhin, A. G. Pominov // Intelligent Information Technology and Mathematical Modelling 2021 (ITMM 2021) IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 2131(2021) 052045. — EDN WFMUUI. — DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052045.
10. Сичкарёв В. И. Вычислительная технология преобразования истинного спектра волнения в кажущийся / В. И. Сичкарёв, В. П. Умрихин // Транспортное дело в России. — 2022. — № 4. — С. 146–148. — EDN BOTUWJ. — DOI: 10.52375/20728689_2022_4_146.

REFERENCES

1. Sichkarev, V. I., V. P. Umrikhin and M. D. Tarasenko. "Identification of wave conditions based on the ship's pitching spectrum." *Transport Business in Russia* 7 (2024): 156–161.

2. Davidan, I. N., L. I. Lopatukhin and V. A. Rozhkov. *Vetrovoe volnenie kak veroyatnostnyy gidrodinamicheskiy protsess*. Gidrometeoizdat, 1978: 288.
3. Tsarik, R. S. "Evaluating the metacentric height of container ship influence on generation of conditions contributing to the occurrence of parametric rolling resonance." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 13.3 (2021): 359–371. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-359-371.
4. Tsarik, R. S. "Comprehensive approach to safety of maritime container transportation." *World of Transport and Transportation* 14.3(64) (2016): 212–231.
5. Council, World Shipping. "Containers Lost at Sea." Web. May 09, 2026 < <https://www.worldshipping.org/containers-lost-at-sea> >.
6. Tarasenko, M. D. "An overview of the ship's navigation tools for assessing the pitching of a ship." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 1 (2024): 123–131.
7. Sichkarev, V. I., V. P. Umrikhin and B. V. Palagushkin . RU 2 813 122 C1, G 06 Q 10/04G 08 G 99/00B 63 B 39/14. Sposob kontrolya i obespecheniya bezopasnosti shtormovogo plavaniya sudna. Russian Federation, assignee. Publ. February 6, 2024.
8. Sichkaryov, V. I., V. P. Umrikhin et al. *Teoreticheskie osnovy shtormovogo plavaniya*. Novosibirsk: SGUVT, 2021: 210.
9. Sichkarev, V. I., P. V. Umrikhin and A. G. Pominov. "Recording of the ship's motion in operation on irregular waves and its processing." *Journal of Physics: Conference Series* 2131.5 (2021): 052045. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052045.
10. Sichkarev, V. I. and V. P. Umrikhin. "Computational technology for converting the true spectrum of excitement into an apparent one." *Transport Business in Russia* 4 (2022): 146–148. DOI: 10.52375/20728689_2022_4_146.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сичкарев Виктор Иванович — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта» 630099, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33. e-mail: svny89@mail.ru.

Умрихин Виктор Павлович — доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта» 630099, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33. e-mail: umrvic@mail.ru

Тарасенко Максим Дмитриевич — аспирант ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта». 630099, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33. e-mail: pilot578@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sichkarev, Viktor I. — Doctor of Technical Sciences, Professor Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Water Transport". 33, Shchetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russian Federation. e-mail: svny89@mail.ru.

Umrikhin, Viktor P. — Doctor Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Navigation. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Water Transport". 33, Shchetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russian Federation. e-mail: umrvic@mail.ru

Tarasenko, Maxim D. — Postgraduate Student Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Water Transport". 33, Shchetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russian Federation. e-mail: pilot578@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 06 мая 2026 г.
Received: May 6, 2026.

УЧЕТ ГРЯД И ВОЛН РУСЛОВОГО РЕЛЬЕФА ПРИ РАСЧЕТЕ УМЕНЬШЕНИЯ ГЛУБИНЫ НА СУДОВОМ ХОДУ ПРИ ПОБОЧНЕВОМ СТРОЕНИИ ДНА

Р. В. Заварзин

ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Задачей настоящего исследования является анализ изменения размеров гряд и волн руслового рельефа в бытовых и проектных условиях прорези с целью разработки способа их учета при определении уменьшения глубины. Дополнительной задачей является определение крутизны гряд и волн в зависимости от их месторасположения на побочне. Исследование выполнено на основе экспериментальных данных, полученных в гидравлическом лотке с подвижным песчаным дном, состоящим из побочных. В результате установлено, что при уменьшении глубины потока от подваля к гребню побочной относительные высоты гряд (отношение высоты гряд к глубине потока) увеличиваются с 0,08 до 0,18. Под грядами формируются волны руслового рельефа II уровня, длина которых в 3–4 раза превышает длину гряд, а высота близка к их высоте. При этом относительные высоты волн изменяются вслед за изменением высот гряд в аналогичной пропорции. Детальному анализу подвергся участок переката в бытовом и проектном состоянии с прорезью. В бытовом состоянии относительные высоты гряд составили 0,13, тогда как в прорези 0,07. Относительные высоты волн II уровня также уменьшились с 0,15 до 0,09. Такие особенности рельефа дна прорезей необходимо учитывать при проектировании дноуглубительных работ. Предложен способ расчета уменьшения глубины судового хода в прорезях, основанный на учете суммарного влияния гряд и волн руслового рельефа II уровня. Дополнительно выполнен анализ крутизны гряд и волн на различных участках побочных. Установлено, что выраженной зависимости крутизны этих форм от глубины потока и месторасположения нет.

Ключевые слова: донные гряды, волны руслового рельефа, дноуглубительная прорезь, побочный вид, русловый процесс, крутизна гряд, иерархия донных форм, высота гряд.

Для цитирования:

Заварзин, Р. В. Учет гряд и волн руслового рельефа при расчете уменьшения глубины на судовом ходу при побочном строении дна / Р. В. Заварзин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 4. С. 664–676. EDN RWSNLC. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-664-676.

ACCOUNTING FOR DUNES AND CHANNEL-BED WAVES WHEN CALCULATING DEPTH REDUCTION IN THE NAVIGATION CHANNEL WITH A SIDE-BAR BED CONFIGURATION

R. V. Zavarzin

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russian Federation

The objective of the present study is to analyze changes in the dimensions of dunes and channel-bed waves under natural conditions and under design conditions with a dredge cut, with the aim of developing a method for accounting for them when determining depth reduction. An additional objective is to determine the steepness of dunes and waves depending on their location on the side bar. The study is based on experimental data obtained in a hydraulic flume with a movable sandy bed composed of side bars. The results show that, as the flow depth decreases from the trough to the crest of the side bars, the relative heights of dunes (the ratio of dune height to flow depth) increase from 0.08 to 0.18. Beneath the dunes, second-level channel-bed waves are formed, whose lengths are three to four times greater than the dune length, while their heights are close to the dune height. At the same time, the relative wave heights vary in proportion to changes in dune heights. A riffle reach was subjected to detailed

analysis in its natural state and in the design state with a dredge cut. In the natural state, the relative dune height was 0.13, whereas in the dredge cut it was 0.07. The relative heights of second-level waves also decreased from 0.15 to 0.09. Such features of the bed relief in dredge cuts must be taken into account when designing dredging operations. A method is proposed for calculating depth reduction in the navigation channel within dredge cuts based on the combined effect of dunes and second-level channel-bed waves. In addition, the steepness of dunes and waves was analyzed at different locations on the side bars. It was established that there is no pronounced dependence of the steepness of these forms on flow depth or location.

Key words: bed dunes, channel-bed waves, dredge cut, side-bar, channel pattern, dune steepness, bedform hierarchy, dune height.

For citation:

Zavarzin, Ruslan V. "Accounting for dunes and channel-bed waves when calculating depth reduction in the navigation channel with a side-bar bed configuration." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.4 (2026): 664–676. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-664-676.

Введение (Introduction)

Судоходство на внутренних водных путях играет ключевую роль в транспортной системе России, обеспечивая эффективную и экономически выгодную перевозку грузов и пассажиров. Особенно важное значение судоходство имеет для отдаленных от промышленных центров регионов Сибири, Дальнего Востока и Арктической зоны, где сконцентрирована значительная часть ресурсов, необходимых для развития России. В этих регионах страны речной транспорт нередко является единственным доступным средством массовых перевозок грузов. Однако обеспечение стабильных и безопасных условий судоходства на реках сопряжено с множеством сложностей, связанных с природными процессами.

Одним из значимых факторов, влияющих на условия судоходства, являются русловые деформации, которые происходят вследствие перемещения донных наносов под воздействием водного потока. На дне реки находятся русловые формы различных масштабов, которые оказывают ограничивающее влияние на условия судоходства. На таких лимитирующих участках рек дноуглубление является одним из способов обеспечения необходимых судоходных условий [1]. Сразу после дноуглубления дно прорезей деформируется и происходит формирование гряд, гребни которых имеют высотные отметки, превышающие отметки проектного dna прорези (рис. 1). Вследствие этого наблюдается уменьшение глубины на судовом ходу.

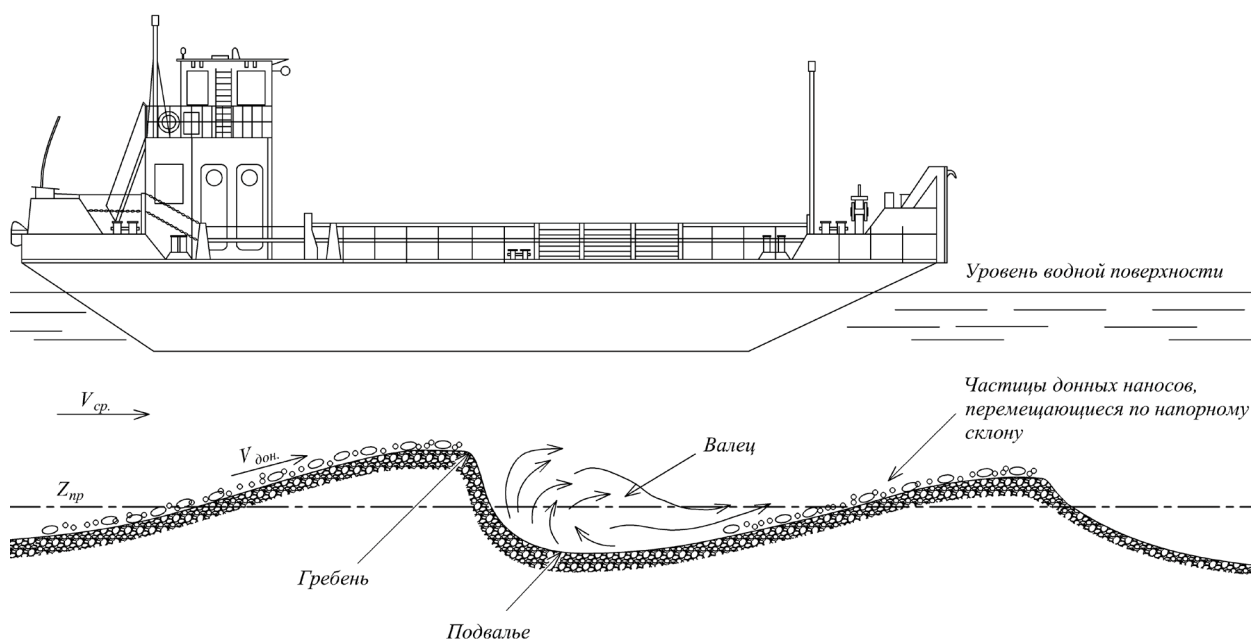


Рис. 1. Схема грядового dna и структуры потока ($Z_{пр}$ — проектная отметка прорези)

Fig. 1. Diagram of the Dune Bed and Flow Structure ($Z_{пр}$ — Design Elevation of the Dredge Cut)

Для учета гряд при прогнозировании уменьшения глубины на судовом ходу необходимо корректное представление о средних высотах гряд, формирующихся в прорезях. Общепринятым является мнение о том, что высота и длина гряд имеют тесную связь с параметрами потока [2–5]. Отношение высоты гряд к глубине потока в условиях равнинных судоходных рек в среднем составляет 0,11 при $Fr \leq 0,2$ и 0,13 при $0,2 \leq Fr \leq 0,5$ [6], где Fr — число Фруда. Однако, как показывают некоторые натурные наблюдения и экспериментальные исследования, эти зависимости не всегда выполняются, гряды в прорези оказываются меньше гряд в бытовых условиях [7].

Дополнительной причиной уменьшения глубины на судовом ходу является формирование под грядами волн руслового рельефа [7]. Анализ этих волновых форм посвящены работы [8, 9]. Известны и англоязычные работы на эту тему, выполненные как в натурных условиях на р. Ваал (Нидерланды) [10], так и в ходе экспериментальных исследований [11]. Согласно работам [7, 12], находящиеся под грядами волны руслового рельефа II уровня имеют высоту на 15–30 % меньше высоты гряд, а их длина в 3–4 раза больше длины гряд.

Другим важным параметром донных гряд является их крутизна, а именно отношение высоты к длине гряд. Так, например, надежность русловых прогнозов, выполняемых с использованием методов математического моделирования при проектировании инженерных мероприятий на судоходных реках в значительной степени зависит от точности оценки гидравлического сопротивления [13]. Профессор Г. Л. Гладков пишет: «В естественных русловых потоках сопротивление движению воды создается группой факторов: зернистой шероховатостью дна, донными волнами — грядами и рифелями, русловыми формами — побочными, осередками и изгибами русла, водной растительностью, а в зимнее время — нижней поверхностью льда и шугой.» [14, с. 2].

Следует отметить, что под донными волнами в работе [14] понимаются только рифели и гряды, тогда как в настоящей работе под донными волнами подразумеваются донные формы, находящиеся между микро- и мезоформами, не обладающие дискретностью. Вопрос вклада волн руслового рельефа в общее сопротивление в настоящее время остается дискуссионным. Однако исследование геометрических характеристик этих волн, в частности их крутизны, представляет значительный научный и практический интерес, поскольку позволяет уточнить закономерности формирования руслового рельефа. Величина гидравлического сопротивления, по имеющимся представлениям, в том числе зависит от крутизны гряд [15]. Исходя из этого, актуальной задачей является исследование изменения крутизны гряд в зависимости от места их расположения, дополнительной — исследование крутизны волн руслового рельефа.

Одним из наиболее распространенных типов руслового процесса на равнинных судоходных реках является побочный тип. При таком строении дна русла лимитирующим для судоходства участком является пережат, где на практике часто выполняется дноуглубление. Задачами настоящего исследования являются установление особенностей строения грядового рельефа дна при побочном типе руслового процесса, а также разработка способа учета гряд и волн руслового рельефа при расчете уменьшения глубины в прорези. Решение этих задач выполняется посредством экспериментальных исследований.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Экспериментальные исследования проводились в русловой гидравлической лаборатории Государственного гидрологического института (ГГИ) по методике, разрабатываемой и многократно апробированной в отделе русловых процессов ГГИ [16]. Эксперименты проводились в 50-метровом гидравлическом лотке с металлическим дном и стеклянными стенками (ширина лотка 2,0 м, высота стенок 0,7 м, дно горизонтальное, максимальный расход воды 47 л/с). Подача воды в лоток производится из мерных баков с треугольным водосливом с тонкой стенкой. Для успокоения воды, поступающей из баков, применяются металлические сетчатые ящики, заполненные путаной полиэтиленовой нитью. Регулирование глубины и уровней воды в лотке производится с помощью концевого водосливного затвора. Общий вид 50-метрового гидравлического лотка приведен на рис. 2.

Гидравлические условия эксперимента приведены в табл. 1. В качестве донного материала использовался песок со средней крупностью 0,29 мм. В заданных гидравлических условиях обеспечивалось движение всех фракций донных наносов.

а)



б)



Рис. 2. Вид 50-метрового гидравлического лотка со стороны бака с водосливом (а) и вид тележки с измерительным оборудованием (б)

Fig. 2. View of the 50-m Hydraulic Flume from the Tank with the Weir (a) and View of the Carriage with Measuring Equipment (b)

Таблица 1

Гидравлические условия эксперимента

Table 1

Hydraulic Conditions of the Experiment

Расход воды, л/с	Глубина потока, см	Средняя скорость потока, см/с	Fr	Начальные условия	t, мин
47,0	8 — средняя	27,7	0,31	Гладкое песчаное дно, состоящее из побочней	840
	13,0 — в прорези	24,4 — в прорези	0,22	Прорезь выполнена на перекате, ширина прорези 50 см и глубиной выемки 2–4 см	1 800

Исходное гладкое песчаное дно в данном эксперименте состояло из двух побочней и переката. Эта поверхность строилась вручную по материалам эксперимента (Католиков В. М. Экспериментальные исследования побочневого типа руслового процесса: автореф. дисс. канд. техн. — Санкт-Петербург, 2000. — 24 с.). На начальном этапе эксперимента в лоток подавался необходимый расход воды и затем постепенно по всей длине рабочего участка лотка формировались гряды. Для обеспечения баланса наносов в лотке на протяжении всех экспериментов в начало рабочего участка лотка подавались донные наносы в объеме, равном объему выноса наносов в конце

рабочего участка. По прошествии 14 ч размеры гряд стабилизировались, а режим течения приблизился к режиму, наблюдавшемуся в эксперименте В. М. Католикова.

Для измерения рельефа песчаного дна использовался эхолот Vectrino. Эхолотирование осуществлялось по 36 продольникам, расположенным на расстоянии 10 см от левого борта (ЛБ) лотка и далее с интервалом 5 см по ширине лотка, заканчивая на расстоянии 10 см от правого борта (ПБ) лотка. По полученным данным был построен план рельефа лотка (рис. 3). Все размеры на плане даны в сантиметрах, высотные отметки отсчитываются от дна лотка. Расположение продольников можно определить на плане исходя из расстояния B , приведенного от ЛБ лотка.

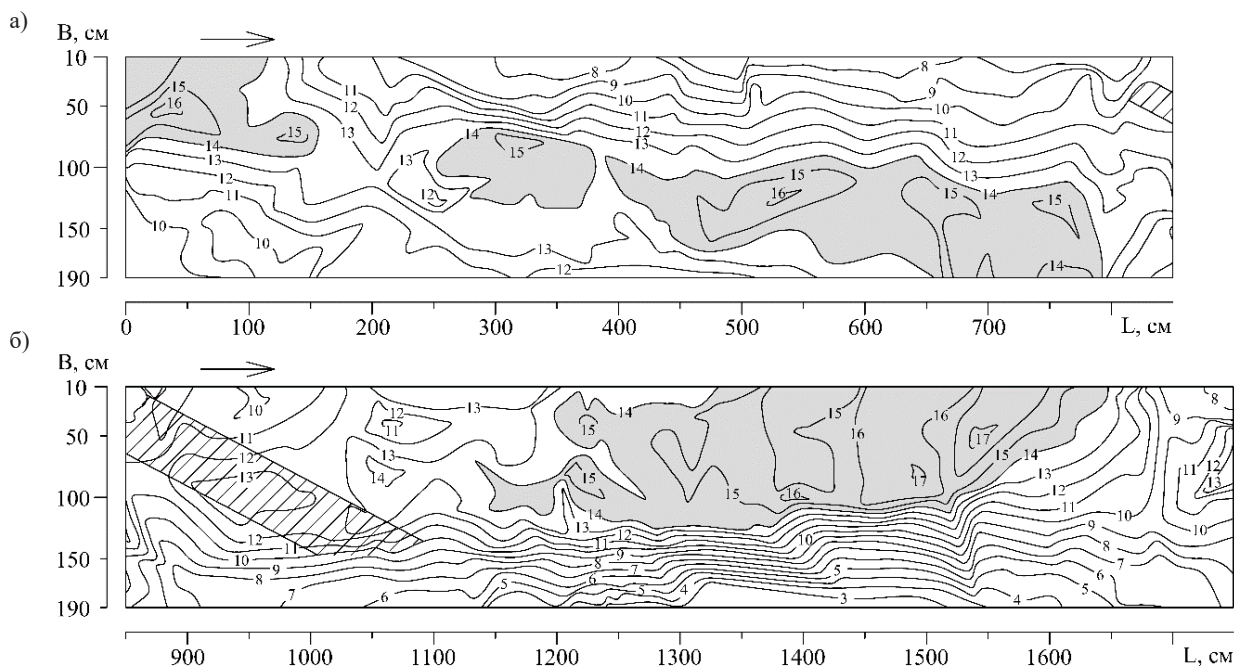


Рис. 3. План рельефа лотка: фрагменты от 0 до 850 см (а) и от 850 см до 1 750 см, где B — расстояние от левого борта лотка; L — расстояние от начала рабочего участка лотка; ■ — наивысшие высотные отметки побочней; ▨ — дноуглубительная прорезь

Fig. 3. Plan of the Flume-Bed Relief: Sections from 0 to 850 cm (a) and from 850 to 1,750 cm (b), where B is the Distance from the Left Side of the Flume; L is the Distance from the Beginning of the Working Section of the Flume; ■ — Highest Side-Bar Elevations; ▨ — Dredge Cut

Для определения гряд на продольниках применяется метод выделения гряд и фильтрации малых выступов, разработанный автором и опубликованный в [17]. При выделении гряд (волн I уровня) фильтровались все малые выступы донного рельефа, имеющие высоту менее 0,2–0,3 см. При выделении волн рельефа дна II уровня использовался метод последовательной интерполяции, согласно которому поверхностью волн является линия подвалов гряд, а подвалами волн — линия, проведенная по точкам смены градиента с отрицательного на положительный.

Результаты (Results)

На рис. 4 приведены продольные профили двух побочней. Высотные отметки дна по длине побочней меняются в диапазоне от 1 до 17 см, глубины потока также меняются в широком диапазоне от 5 см на гребнях до 20 см в подвалах побочней. Для анализа размеров гряд каждый побочень был разделен на четыре участка с близкими значениями глубины. Участок 1, расположенный в подвалье побочня, имеет наибольшие глубины 12,7 см, участки 2 и 3 расположены на напорных склонах, где глубина потока уменьшается до 10,5 и 7,6 см. Участок 4 находится на гребнях побочней, где глубины наименьшие — 5,7 см. На рис. 4 побочень у ПБ не имеет участка 2, что объясняется недостаточной длиной рабочего участка лотка.

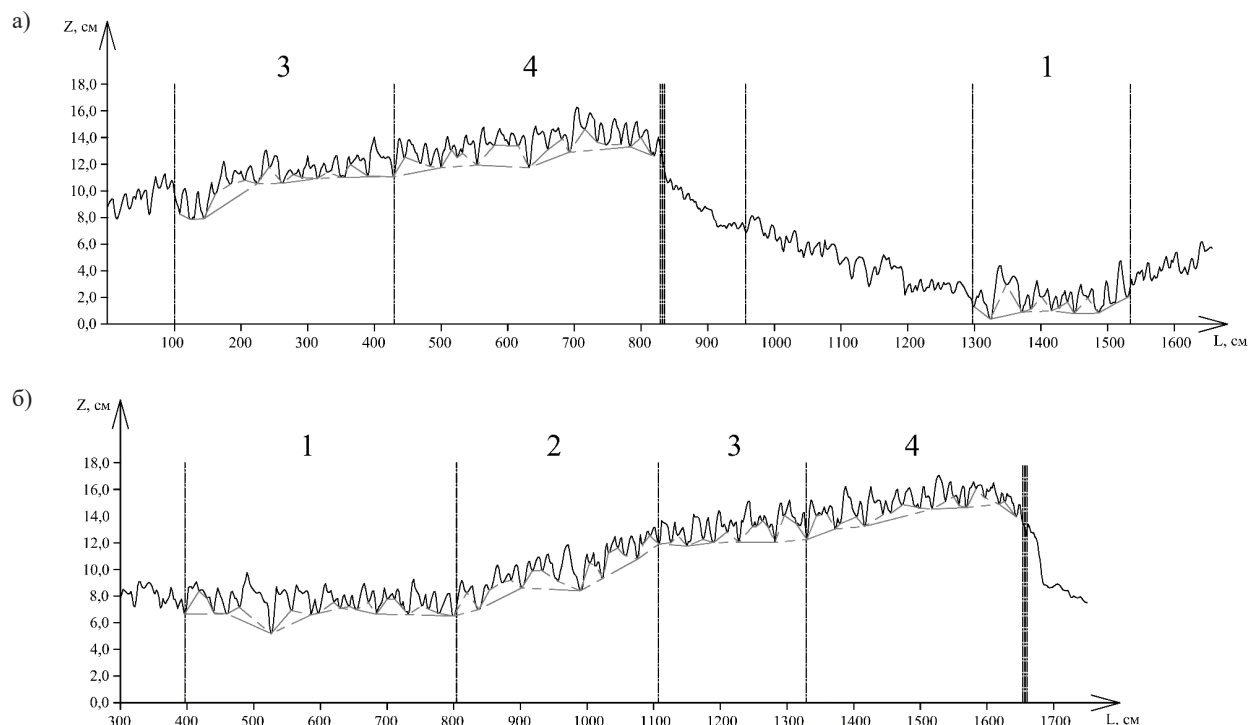


Рис. 4. Продольный профиль побочня: а — расположенного ближе к ПБ (185 см от ЛБ); б — расположенного ближе к ЛБ (15 см от ЛБ)

Условные обозначения:

L — расстояние от начала участка измерений; Z — высота над дном лотка

Fig. 4. Longitudinal Profile of a Side Bar: a — Located Closer to the Right Side of the Flume (185 cm from the Left Side); b — Located Closer to the Left Side of the Flume (15 cm from the Left Side)

Обработке подвергаются продольники, охватывающие напорные склоны побочней и расположенные через каждые 5 см на расстоянии 10–60 см от ЛБ (побочень у ЛБ) и 160–190 см (побочень у ПБ). На каждом участке удалось выделить в среднем по 176 гряд на побочне у ЛБ и 112 гряд на побочне у ПБ. Под грядами фиксируются волны II уровня, поверхности и основания которых обозначены на рис. 4 серыми штриховыми линиями. Средние абсолютные длины и высоты гряд и волн приведены в табл. 2 и 3.

Можно заметить, что на напорном склоне побочней (участки 1–3) длины гряд почти не изменяются. На гребне побочней (участок 4) длины гряд уменьшаются в среднем на 0,5 см. Похожие изменения происходят также в высотах гряд — заметное уменьшение высоты наблюдается только на гребнях побочней. Длины волн в среднем составляют 3–4 длины гряд, а их высота отличается от высоты гряд на 0–10 %.

Таблица 2

Средние абсолютные размеры гряд и волн на побочне у левого борта лотка

Table 2

Mean Absolute Dimensions of Dunes and Waves on the Side Bar near the Left Side of the Flume

Уровень русловых форм	Характеристики	Участок 1	Участок 2	Участок 3	Участок 4
		$H = 12,7$ см	$H = 10,5$ см	$H = 7,6$ см	$H = 5,7$ см
I (гряды)	Длина, см	13,5	13,5	13,6	12,2
	Высота, см	1,17	1,24	1,21	1,05
II (волны)	Длина, см	43,5	46,0	41,1	36,2
	Высота, см	1,17	1,35	1,30	1,04

Таблица 3

Средние абсолютные размеры гряд и волн на побочне у правого борта лотка (ПБ)

Table 3

Mean Absolute Dimensions of Dunes and Waves on the Side Bar near the Right Side of the Flume

Уровень русловых форм	Характеристики	Участок 1	Участок 3	Участок 4
		$H = 18,0$ см	$H = 9,9$ см	$H = 7,5$ см
I (гряды)	Длина, см	13,7	13,7	13,2
	Высота, см	1,15	1,13	1,12
II (волны)	Длина, см	42,7	45,6	41,1
	Высота, см	1,19	1,25	1,10

Дополнительно для анализа размеров гряд были рассчитаны относительные высоты гряд и волн, являющиеся отношением высоты к глубине потока, результаты приведены на рис. 5 и 6. Видно, что при уменьшении глубины потока происходит увеличение относительных высот как гряд, так и волн. На участке 1 на побочне у ЛБ относительная высота гряд составляет в среднем 0,095, на побочне у ПБ — 0,067. На участке 4 исследуемый параметр повышается, достигая значений 0,20 на побочне у ЛБ и 0,15 на побочне у ПБ. Высоты волн II уровня увеличиваются в аналогичной пропорции.

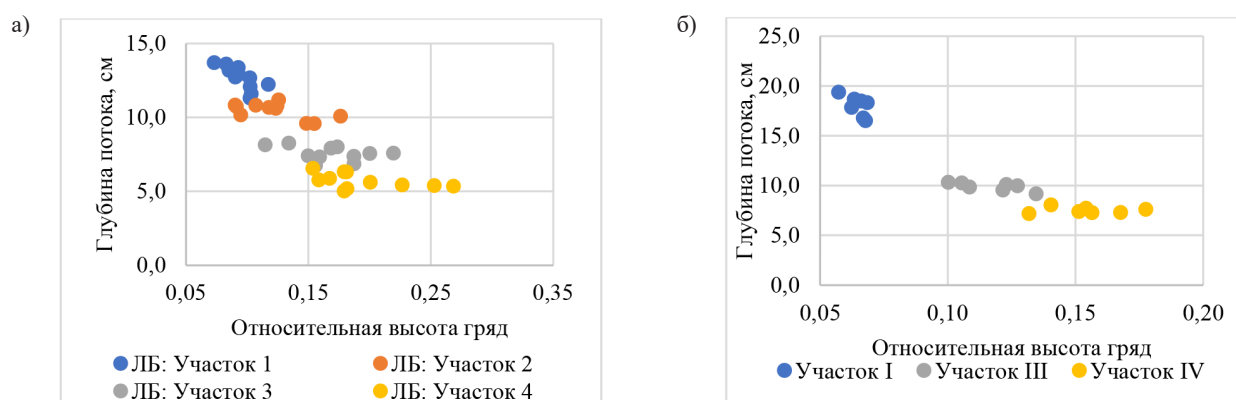


Рис. 5. Средние относительные высоты гряд на побочнях: а — у левого борта; б — у правого борта

Fig. 5. Mean Relative Dune Heights on the Side Bars:

a — near the Left Side of the Flume; b — near the Right Side of the Flume

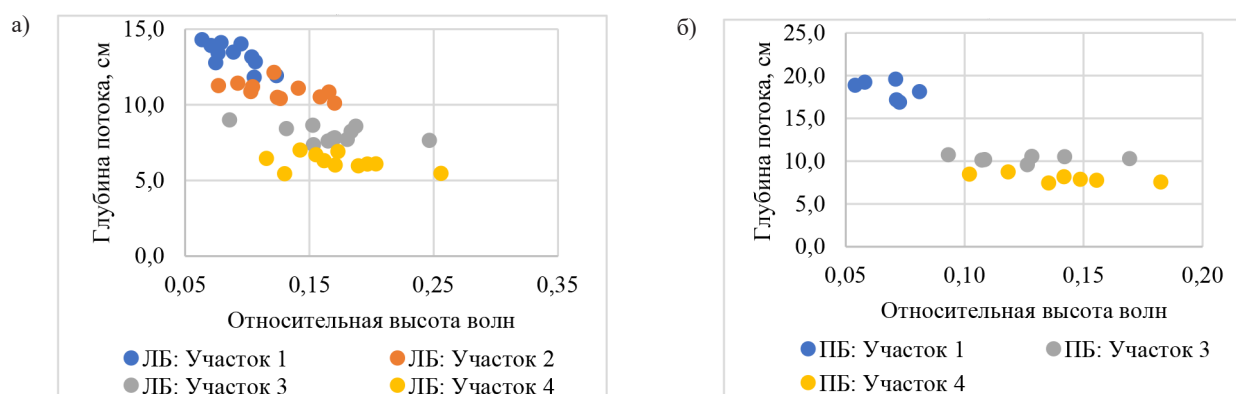


Рис. 6. Средние относительные высоты волн на побочнях: а — у левого борта; б — у правого борта

Fig. 6. Mean Relative Wave Heights on the Side Bars:

a — near the Left Side of the Flume; b — near the Right Side of the Flume

Наиболее важным с точки зрения судоходства является пережат, поэтому отдельному анализу были подвергнуты гряды и волны на этом участке – продольные отметки 800–1200 см и поперечные 60–140 см. Многоуровневое строение рельефа здесь аналогично строению на соседних участках, под грядами фиксируются волны II уровня, высоты гряд и волн приведены в табл. 4 (бытовое состояние). Видно, что абсолютная высота гряд на пережатке меньше на 1–2 мм, чем на соседних участках (см. табл. 2 и 3). Высота волн II уровня уменьшается на сопоставимую величину. Корректное измерение длин гряд и волн в прорези провести не удалось, так как гряды на пережатке повернуты под углом к направлению течения, а измерение рельефа выполнялось параллельно течению.

Таблица 4

Размеры гряд и волн на пережатке в бытовом и проектном состояниях

Table 4

Dimensions of Dunes and Waves on the Riffle in the Natural and Design States

Уровень	Характеристики	Бытовое состояние $H_{\text{пот}} = 8,0$ см	Проектное состояние $H_{\text{пот}} = 12,1$ см
I (гряды)	Число гряд	113	127
	Высота, см	1,06	0,79
	Относительная высота	0,13	0,07
II (волны)	Число волн	26	42
	Высота, см	1,16	1,15
	Относительная высота	0,15	0,09

Далее создавалась короткая эксплуатационная прорезь на пережатке, местоположение которой показано на рис. 3. Глубина выемки грунта составила 2–4 см. После повторного начала подачи воды в прорези начали формироваться гряды, которые через 10 ч достигли своих стабильных размеров. Одновременно верхняя часть прорези занеслась наносами, свободной осталась только нижняя часть начиная с продольной отметки 900 см (см. рис. 3). Как видно в табл. 4 (проектное состояние), абсолютная высота гряд в свободной части прорези уменьшилась на 25 %, тогда как относительная высота уменьшилась почти в 2 раза. Абсолютная высота волн II уровня изменилась незначительно, относительная уменьшилась на 40 %.

Для подробного анализа измерений параметров гряд в прорези были построены гistogramмы абсолютных и относительных высот в зависимости от расположения в прорези (рис. 7). На гistogramмах черные вертикальные линии отделяют гряды в верхней части прорези от гряд в нижней свободной части прорези.

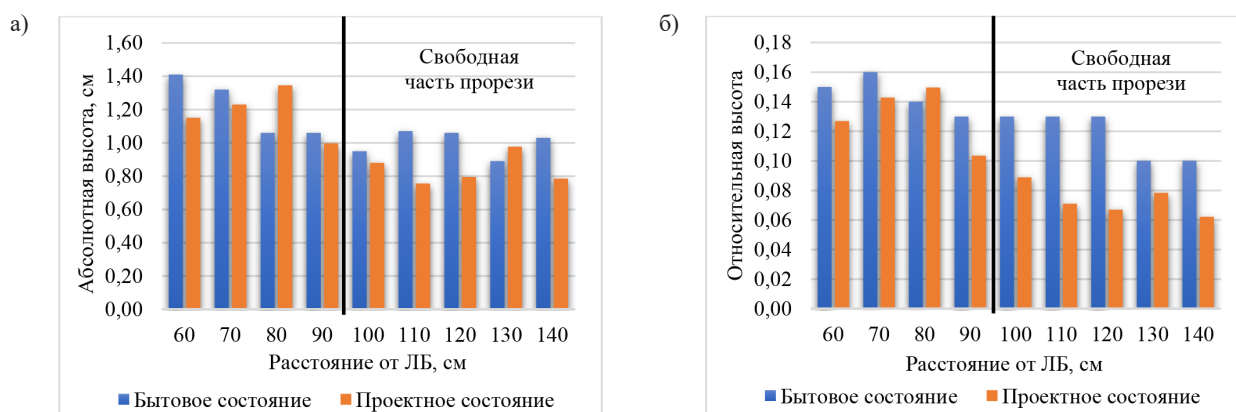


Рис. 7. Абсолютные (а) и относительные (б) высоты гряд на пережатке в бытовом и проектном состояниях
Fig. 7. Absolute (a) and Relative (b) Dune Heights on the Riffle in the Natural and Design States

Можно заметить, что гряды в верхней части прорези в среднем восстановились до высот, характерных для бытового состояния. В нижней свободной части прорези сохраняется уменьшение абсолютной высоты гряд на 7–24 %. В одном случае (продольник 130 см от ЛБ) высота гряд увеличилась на 10 %, однако на общую тенденцию это не влияет.

Обсуждение (Discussion)

Результаты настоящего экспериментального исследования позволяют выделить ряд особенностей в строении грядового рельефа дна на различных участках побочной. Донные гряды изменяют свои размеры в зависимости от места их расположения: при уменьшении глубины потока при переходе от подвалей к гребням побочной происходит уменьшение высот гряд и волн. Согласно общепринятому мнению, высота гряд составляет в среднем 0,11–0,13 от глубины потока [6], однако при меняющихся глубинах потока это соотношение изменяется. Абсолютные значения высот и длин гряд изменяются незначительно (табл. 2 и 3). Наиболее выраженное уменьшение происходит у относительных высот (отношение высоты гряд $h_{гр}$ к глубине потока H). Исходя из результатов измерений гряд на побочных, можно рассчитать средние относительные высоты гряд на различных участках побочного дна:

- участок 1 (подвалье): $h_{гр} = 0,08H$;
- участок 2: $h_{гр} = 0,12H$;
- участок 3: $h_{гр} = 0,15H$;
- участок 4 (гребень): $h_{гр} = 0,18H$;
- пережат (бытовое состояние): $h_{гр} = 0,13H$;
- пережат (проектное состояние с прорезью): $h_{гр} = 0,07H$.

Представленные зависимости не носят абсолютный характер, а только лишь иллюстрируют изменения высот гряд в конкретном случае.

Вне зависимости от участка на побочке под грядами фиксируются волны руслового рельефа II уровня. По своим размерам волны находятся в зависимости от гряд, их длина превышает длину гряд в 3–4 раза, а высота является близкой к высоте гряд. При уменьшении глубины потока относительные высоты волн также плавно уменьшаются, как и высоты гряд (см. рис. 7). Эти наблюдения совпадают с результатами предыдущих исследований автора при ровном строении песчаного дна лотка [7], а также с результатами анализа рельефа пережатов р. Волга [12].

Для анализа крутизны гряд и волн был проведен расчет этого параметра в зависимости от участка расположения, результаты приведены на рис. 8. Можно заметить, что вне зависимости от месторасположения гряд крутизна варьируется в узком диапазоне от 0,07 до 0,11 (в среднем 0,09). Такая крутизна соответствует привычным диапазонам этого параметра от 0,01 до 0,2 [15]. Крутизна волн II уровня колеблется в узком диапазоне от 0,02 до 0,04 и не зависит от места расположения волны на побочке.

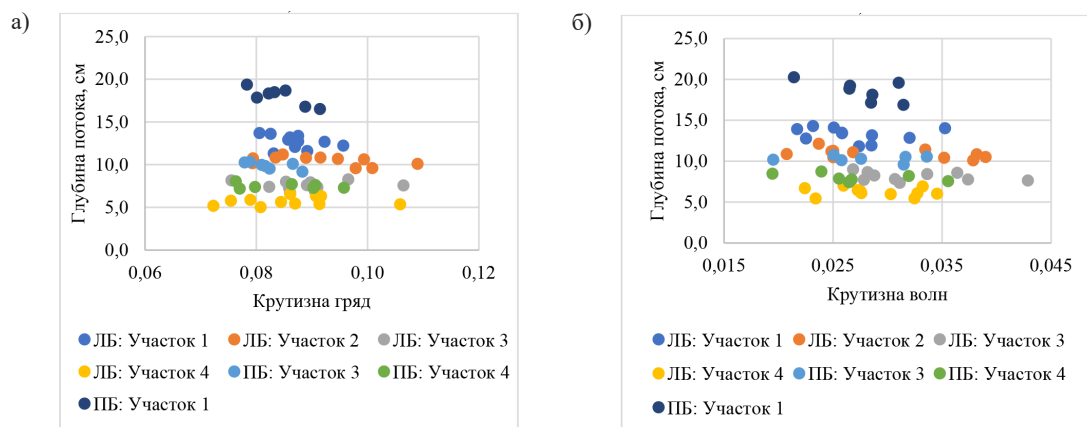


Рис. 8. Средняя крутизна гряд (а) и волн II уровня (б)
Fig. 8. Mean Steepness of Dunes (a) and Second-Level Waves (b)

Результаты измерений позволяют рассчитать уменьшение глубины на судовом ходу, вызванное формированием гряд и волн II уровня, с целью создания запаса на заносимость. Как видно на рис. 1, линия проектного дна прорези делит грядовой рельеф на две примерно равные части, расположенные выше и ниже проектной отметки. Ограничивает проектную глубину часть руслового рельефа, находящаяся выше проектного дна прорезей, поэтому уменьшение глубины принимается равным половине суммы высот гряд и волн II уровня. Исходя из суммы высот гряд и волн II уровня, можно рассчитать искомое уменьшение по формуле

$$\Delta_H = \frac{h_{гр} + h_{II}}{2H},$$

где Δ_H — уменьшение глубины потока в прорези; h_{II} — высота волн II уровня.

Учет волн II уровня при создании запаса на заносимость целесообразно проводить при длине прорези, достаточной для формирования на ее дне хотя бы двух волн II уровня, т. е. длина прорези должна превышать длину гряд более чем в 6 раз. При длине прорези, превышающей длину шести волн II уровня (или восемнадцати длин гряд), появляются условия для формирования волн III уровня (в этом случае требуется дополнительно их учет).

Представленный способ прогнозирования уменьшения глубины в прорезях может использоваться при проектировании дноуглубительных работ в руслах равнинных рек и при режимах течения, когда скорость потока превышает неразмывающую. При этом размеры гряд и волн руслового рельефа могут варьироваться в достаточно широких пределах в зависимости от гидравлических условий, поэтому представленный способ должен применяться на основе измерений грядового рельефа дна на каждом конкретном участке реки.

Заключение (Conclusion)

Выполненное экспериментальное исследование позволило уточнить особенности строения грядового рельефа дна при побочном типе руслового процесса и оценить его влияние на уменьшение глубины на судовом ходу после дноуглубления. Установлено, что размеры донных гряд существенно зависят от их месторасположения на побочке: при переходе от подвалья к гребню побочки наблюдается увеличение относительных высот гряд от 0,08H до 0,18H, что существенно отличается от привычного диапазона значений этого параметра — 0,11–0,13. Это указывает на ограниченность применения общепринятых расчетных методов определения высоты гряд в условиях побочного строения дна. Одновременно происходит уменьшение абсолютных высот гряд на 3–10 %.

Установлено, что на всем протяжении побочного рельефа под донными грядами расположены волны руслового рельефа II уровня, параметры которых находятся в тесной взаимосвязи с параметрами гряд. Высота этих волн близка к высоте гряд, тогда как их длина превышает длину гряд в 3–4 раза. Относительные высоты волн II уровня, так же, как и относительные высоты гряд, уменьшаются при снижении глубины потока. Полученные результаты хорошо согласуются с ранее выполненными экспериментальными и натурными исследованиями и подтверждают универсальность выявленных закономерностей между параметрами гряд и волн.

Исследованы изменения размеров гряд на участке переката в бытовом и проектом состояниях с прорезью. По прошествии 14 ч с начала повторной подачи воды в лоток произошла стабилизация размеров гряд в прорези. После повторной подачи воды в лоток началось формирование гряд в прорези. Затем после стабилизации размеров гряд было выполнено их измерение. Результаты измерений гряд показали изменение их относительных высот: в бытовом состоянии относительная высота на перекате составляла 0,13H, тогда как в проектом она уменьшилась до 0,07H. Под грядами фиксируются волны II уровня, при уменьшении глубины потока после дноуглубления относительные высоты волн также уменьшаются с 0,15 до 0,09. Такие особенности в строении

рельефа дна прорезей необходимо учитывать при прогнозировании уменьшения глубины на судовом ходу после дноуглубления.

Анализ крутизны гряд и волн руслового рельефа II уровня показал отсутствие выраженной зависимости этого параметра от расположения на побочке. Крутизна гряд находится в узком диапазоне от 0,07 до 0,11, что соответствует известным зависимостям. Крутизна волн II уровня находится в диапазоне от 0,02 до 0,04 и также не зависит от расположения волн на побочке.

На основе полученных экспериментальных данных предложен способ учета гряд и волн руслового рельефа II уровня при расчете уменьшения глубины на судовом ходу в прорези. Уменьшение глубины рассчитывается как половина от суммы высот гряд и волн II уровня. При длине прорези более чем 18 длин гряд дополнительно необходим учет волн III уровня. Такие расчеты необходимо проводить на основе измерений малых русловых форм на конкретном участке реки.

Благодарности (Acknowledgements)

Работа выполнена по планам НИР (ГЗ) «Развитие методов оценки ресурсов поверхностных вод Российской Федерации, расчетов гидрологических характеристик и моделирования гидрологических процессов» отдела русловых процессов Государственного гидрологического института.

Автор выражает благодарность научному руководителю канд. техн. наук, доц. В. М. Католикову за большую помощь в проведении исследований, ценные замечания и рекомендации в процессе проведения исследования, а также коллективу Русловой гидравлической лаборатории Государственного гидрологического института за помощь в проведении экспериментальной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладков Г. Л. Гидроморфология русел судоходных рек: моногр. / Г. Л. Гладков, Р. С. Чалов, К. М. Беркович. — 2 изд., стер. — СПб.: Изд-во «Лань», 2019. — 432 с.
2. Naqshband S., Ribberink J. S., & Hulscher S. J. (2014). Using both free surface effect and sediment transport mode parameters in defining the morphology of river dunes and their evolution to upper stage plane beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(6), 06014010. — DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000873.
3. Гладков Г. Л. Транспорт наносов в реках: зависимость параметров донных гряд от определяющих факторов / Г. Л. Гладков, П. В. Беляков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 52–63. — EDN VUSNQA. — DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63.
4. Best J. (2005), The fluid dynamics of river dunes: A review and some future research directions / J. Best // *J. Geophys. Res.*, 110, F04S02, 2005. — DOI: 10.1029/2004JF000218.
5. Best J. L. The kinematics, topology and significance of dune-related macroturbulence: Some observations from the laboratory and field / J. L. Best // in *Fluvial Sedimentology VII*, edited by M. D. Blum, S. B. Marriott, and S. Leclair, Spec. Publ. Int. Assoc. Sedimentol. — PP. 35, 41–60.
6. Петровская О. А. Оптимизация методов расчета расхода донных наносов с учетом гидравлических параметров рек: дисс. ... канд. техн. наук. — СПб.: Государств. Гидрологический ин-т, 2018. — С. 252.
7. Заварзин Р. В. Экспериментальное исследование строения грядового дна в условиях дноуглубительной прорези / Р. В. Заварзин, В. М. Католиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 33–48. — EDN HPLWPR. — DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-33-48.
8. Сидорчук А. Ю. Оценка стока влекомых наносов в речном русле с учетом данных об активной и пассивной динамике гряд / А. Ю. Сидорчук // Водные ресурсы. — 2015. — Т. 42. — № 1. — С. 31. — EDN TCJCEN. — DOI: 10.7868/S0321059615010137.
9. Алексеевский Н. И. Морфология и динамика активных гряд в русле реки Терек / Н. И. Алексеевский, А. Ю. Сидорчук // Водные ресурсы. — 2017. — Т. 44. — № 2. — С. 147–157. — EDN YIVSNF. — DOI: 10.7868/S0321059617010035.
10. Zomer J. Y. Coexistence of two dune scales in a lowland river / J. Y. Zomer, B. Vermeulen, A. J. F. Hoitink // *Earth Surface Dynamics*. — 2023. — Vol. 11. — P. 1283–1298. — DOI 10.5194/ESURF-11-1283-2023.
11. Das D. (2025). Multiscale bedform reorganization at the onset of substantial suspended sediment transport. / D. Das, V. Ganti & R. C. Mahon // *Geophysical Research Letters*, 52, e2025GL118066. — DOI: 10.1029/2025GL118066.

12. Заварзин Р. В. Учет иерархии русловых форм при выполнении дноуглубительных работ в руслах судоходных рек / Р. В. Заварзин, В. М. Католиков // Гидротехническое строительство. — 2025. — № 1. — С. 27–34. — EDN DVYIKO. — DOI: 10.71917/EP.2025.69.50.005.

13. Журавлев М. В. Обобщение результатов натурных и лабораторных исследований гидравлических сопротивлений на изгибе русла / М. В. Журавлев, Г. Л. Гладков, П. В. Беляков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16, № 5. — С. 726–737. — DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-726-737.

14. Гладков Г. Л. Гидравлическое сопротивление движению воды и транспорт наносов в реках / Г. Л. Гладков, М. В. Журавлев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11, № 6. — С. 1044–1055. — DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.

15. Замышляев В. И. Соотношения между параметрами донных гряд при аппроксимации их продольного сечения треугольником / В. И. Замышляев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16, № 2. — С. 236–250. — DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-236-250.

16. Клавен А. Б. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса / А. Б. Клавен, З. Д. Копалиани. — СПб.: Нестор-История, 2011. — 544 с.

17. Заварзин Р. В. Способ определения расхода донных наносов по параметру средней мощности слоя подвижного материала / Р. В. Заварзин, В. М. Католиков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16, № 6. — С. 847–862. — EDN HZRNN. — DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-847-862.

REFERENCES

1. Gladkov, G. L., R. S. Chalov, K. M. Berkovich. *Gidromorfologiya rusel sudokhodnykh rek : Monografiya*. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo "Lan", 2019: 432.

2. Naqshband, S., J. S. Ribberink and S. J. M. H. Hulscher. "Using Both Free Surface Effect and Sediment Transport Mode Parameters in Defining the Morphology of River Dunes and Their Evolution to Upper Stage Plane Beds." *Journal of Hydraulic Engineering* 140.6 (2014): 06014010. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000873.

3. Gladkov, G. L. and P. V. Belyakov. "Sediment transport in rivers: dependence of the dunes parameters on the determining factors." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 13.1 (2021): 52–63. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63.

4. Best, J. "The fluid dynamics of river dunes: A review and some future research directions." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 110.F4 (2005). DOI: 10.1029/2004JF000218.

5. Best, J. "Kinematics, Topology and Significance of Dune-Related Macroturbulence: Some Observations from the Laboratory and Field." *Fluvial Sedimentology VII*. John Wiley & Sons, Ltd, 2005: 41–60. DOI: 10.1002/9781444304350.ch3.

6. Petrovskaya, O. A. Optimizatsiya metodov rascheta raskhoda donnykh nanosov s uchetom gidravlicheskiy parametrov rek. PhD diss. Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy gidrologicheskiy institut, 2019.

7. Zavarzin, R. V. and V. M. Katolikov. "Experimental study of the structure of the bottom relief in the conditions of a dredging cut." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 17.1 (2025): 33–48. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-33-48.

8. Sidorchuk, A. Yu. "Otsenka stoka vlekomykh nanosov v rechnom rusle s uchetom dannykh ob aktivnoy i passivnoy dinamike gryad." *Vodnye resursy* 42.1 (2015): 31. DOI: 10.7868/S0321059615010137.

9. Alekseevskii, N. I. and A. Y. Sidorchuk. "Morphology and dynamics of active bed forms in the Terek R. Channel." *Water Resources* 44.2 (2017): 226–236. DOI: 10.1134/S0097807817010031.

10. Zomer, J. Y., B. Vermeulen and A. J. F. Houtink. "Coexistence of two dune scales in a lowland river." *Earth Surface Dynamics* 11.6 (2023): 1283–1298. DOI: 10.5194/esurf-11-1283-2023.

11. Das, D., V. Ganti and R. C. Mahon. "Multiscale Bedform Reorganization at the Onset of Substantial Suspended Sediment Transport." *Geophysical Research Letters* 52.22 (2025): e2025GL118066. DOI: 10.1029/2025GL118066.

12. Zavarzin, R. V. and V. M. Katolikov. "Accounting for the hierarchy of bed forms when performing dredging works in the beds of navigable rivers." *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* 1 (2025): 27–34. DOI: 10.71917/EP.2025.69.50.005.

13. Zhuravlev, M. V., G. L. Gladkov and P. V. Belyakov. "Summary of the results of field and laboratory studies of hydraulic resistance during channel bending." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 16.5 (2024): 726–737. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-726-737.

14. Gladkov, G. L. and M. V. Zhuravlev. “Hydraulic resistance to water flow and sediment transport in rivers.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 11.6 (2019): 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.

15. Zamyshlyayev, V. I. “Relationships between river dune parameters when approximating their longitudinal profile by a triangle.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 16.2 (2024): 236–250. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-236-250.

16. Klaven, A. B., Z. D. Kopaliani. *Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and channel processes*. Sankt-Peterburg : Nestor-Istoriya, 2011: 504.

17. Zavarzin, R. V. and V. M. Katolikov. “Method for determining the bed load discharge by the parameter of the average depth of the layer of moving materia .” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 16.6 (2024): 847–862. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-847-862.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Заварзин Руслан Витальевич —
кандидат технических наук
ФГБУ «Государственный гидрологический
институт»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
2-я линия В.О., 23
e-mail: zavarzr@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zavarzin, Ruslan V. —
Candidate of Technical Sciences
State Hydrological Institute
23, 2nd line of Vasilyevsky Island, St. Petersburg,
199004, Russian Federation
e-mail: zavarzr@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 05 апреля 2026 г.
Received: Apr. 5, 2026.*

КЛАССИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ УЧЕТА ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ МОРСКИМИ СУДАМИ

А. С. Реуцкий¹, О. Е. Ольховик², Т. М. Дмитриева³

¹ Российский морской регистр судоходства, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

³ ФКУ «Гидрометсервис», г. Москва, Российская Федерация

В статье выполнена классификация и дан ретроспективный анализ существующих методик учета выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ от морских судов. Рассмотрены основные этапы развития моделей: от первых нисходящих (top-down) и восходящих (bottom-up) подходов, базировавшихся на агрегированной статистике продаж топлива и усредненных характеристиках судов, до современных высокоточных систем, использующих данные береговой и спутниковой автоматической идентификационной системы, системы дальнего слежения LRIT, а также данные мониторинга, отчетности и верификации (MRV). Подробно описаны региональные и глобальные модели (HELCOM, OSPAR, MEET, EMEP, EDGAR, MEERI, STEAM 1.0, 2.0, 3.0), их преимущества и ограничения, а также гибридные подходы и модели химического переноса. Определены ключевые научные задачи дальнейшего развития методологий, связанные с учетом гидродинамического сопротивления, ледовых условий, дифферента, биологического обрастания, альтернативных энергоустановок и цифровых двойников судов. На основе проведенного анализа обоснованы исходные технические требования к созданию гибридной модели оценки выбросов парниковых газов применительно к Российской Федерации, интегрирующей спутниковую автоматическую идентификационную систему, систему дальнего опознавания и слежения (LRIT), национальные базы данных судов, статистику топлива и гидродинамические расчеты, адаптированные для арктических и внутренних водных путей, что позволит обеспечить как международную отчетность, так и внутренний экологический мониторинг.

Ключевые слова: морские суда, суда внутреннего водного плавания, декарбонизация, парниковые газы, автоматическая идентификационная система, HELCOM, OSPAR, MEET, EMEP, EDGAR, MEERI, STEAM, MRV, региональные и глобальные модели судовых выбросов, углеродный след, верификация выбросов, пространственный мониторинг, судовые источники загрязнения.

Для цитирования:

Реуцкий, А. С. Классификация моделей учета выбросов парниковых газов морскими судами / А. С. Реуцкий, О. Е. Ольховик, Т. М. Дмитриева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 4. С. 677–712. EDN RENMLU. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-677-712.

CLASSIFICATION OF MODELS FOR ACCOUNTING FOR GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM SEAGOING SHIPS

A. S. Reutskii¹, E. O. Ol'khovik², T. M. Dmitrieva³

¹ Russian Maritime Register of Shipping, Russian Federation, St. Petersburg

² Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg,
Russian Federation.

³ FKU «Gidrometservis», Moscow Russian Federation

The article presents a classification and retrospective analysis of existing methods for accounting for greenhouse gas and pollutant emissions from seagoing ships. The main stages of model development are considered, from early top-down and bottom-up approaches based on aggregated fuel sales statistics and average ship

characteristics to modern high-precision systems using shore-based and satellite Automatic Identification System (AIS) data, Long-Range Identification and Tracking (LRIT) data, as well as Monitoring, Reporting and Verification (MRV) data. Regional and global models (HELCOM, OSPAR, MEET, EMEP, EDGAR, MEERI, STEAM 1.0, 2.0, 3.0), their advantages and limitations, as well as hybrid approaches and chemical transport models are described in detail. Key scientific tasks for further development of the methodologies are identified, including accounting for hydrodynamic resistance, ice conditions, trim, biofouling, alternative power plants, and ship digital twins. Based on the analysis, initial technical requirements for the development of a hybrid model for assessing greenhouse gas emissions for the Russian Federation are substantiated. The model integrates satellite AIS, LRIT, national ship databases, fuel statistics, and hydrodynamic calculations adapted to Arctic and inland waterways, which will support both international reporting and domestic environmental monitoring.

Keywords: seagoing ships, inland waterway vessels, decarbonization, greenhouse gases, Automatic Identification System, HELCOM, OSPAR, MEET, EMEP, EDGAR, MEERI, STEAM, MRV, regional and global ship emission models, carbon footprint, emissions verification, spatial monitoring, shipboard pollution sources. Automatic Identification System, HELCOM, OSPAR, MEET, EMEP, EDGAR, MEERI, STEAM, MRV regional and global ship's pollutant models, sources of pollution from ships

For citation:

Reutskii, Aleksandr S., E. O. Ol'khovik and T. M. Dmitrieva. "Classification of models for accounting for greenhouse gas emissions from seagoing ships." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 18.4 (2026): 677–712. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-677-712.

Введение (Introduction)

Оценка выбросов парниковых газов в атмосферу включает в себе активно развивающуюся и обширную научную проблематику, содержащую множество внутренних направлений развития. В настоящий момент исследования ведутся одновременно в климатологии, химии атмосферы, экологии, разрабатываются новые способы моделирования и учета выбросов парниковых газов с судов. Усилия многих отечественных и зарубежных исследователей направлены на определение отдельных направлений и на поиск путей их решения в зависимости от специализации самих исследователей. Так, экологи определяют химический состав выбросов судовых источников загрязнения, химики оценивают дальнейшие химические превращения попавших в атмосферу веществ, климатологи оценивают влияние данных процессов на атмосферу Земли при помощи различных оценочных и прогностических моделей.

Несмотря на мультинаправленность и сложность проблематики, разнообразия путей решения ее внутренних задач, одной из основных проблем рассматриваемого научного направления развития науки и техники является учет выбросов парниковых газов, а главным объектом исследования при этом остается судно и производимые им выбросы парниковых газов в атмосферу. Как известно, на облик судна значительным образом влияет перевозимый им груз, который и обуславливает его конструктив, энергетическую составляющую и схему его эксплуатации. Учет совокупности этих и многих других факторов при определении количества и номенклатуры выбросов отдельно взятого судна или флота судов представляет собой научную проблему моделирования и исследования выбросов парниковых газов с судов. В последние годы выполнен переход от относительно простых моделей учета выбросов к более сложным, использующим в том числе автоматические системы идентификации судов (АИС), а также способные накапливать и анализировать большие массивы данных (Big Data).

Целью данной статьи является исследование литературных источников по тематике учета выбросов парниковых газов с судов и представленных в них методик. Определены ключевые существующие методики учета выбросов ПГ с судов, их преимущества и недостатки, а также намечены основные направления развития этого научного знания и актуальные научные задачи, подлежащие разработке. На основе выполненного анализа существующих методик и сопоставления их сильных и слабых сторон, были сформулированы исходные технические требования к модели учета выбросов парниковых газов с морских судов, актуальные для Российской Федерации, которые могут быть востребованы в случае создания этой модели.

Ретроспективное исследование вопроса международного учета выбросов парниковых газов с судов. Изначально вопросы, связанные с учетом выбросов парниковых газов, рассматривались в рамках РКИК ООН¹. Начиная с первого заседания Конференции Сторон РКИК ООН в 1995 г. и по настоящее время, вопросы выбросов от топлива, используемого в международных морских перевозках, рассматриваемые в РКИК ООН в рамках пункта повестки дня «Выбросы в результате использования топлива для международных авиационных и морских перевозок», обсуждаются на постоянной основе в рамках Конвенции [1]. Первая Конференция Сторон (КС) РКИК ООН пригласила среди прочих Международную морскую организацию (ИМО) внести вклад в работу своего вспомогательного органа по консультированию и научно-техническим аспектам (ВОКНТА), связанную с вопросами распределения и контроля выбросов международного бункерного топлива.

В результате сложных переговоров развивающиеся страны, включая Китай, Саудовскую Аравию, при поддержке Российской Федерации настояли на том, что методологические вопросы выбросов от международных перевозок бункерного топлива должны рассматриваться вне национальных кадастров парниковых газов с тем, чтобы избежать двойного учета, а также активно выступали против того, чтобы ВОКНТА выносил одобряющие, руководящие или директивные решения по докладам ИКАО и ИМО.

Опасения были связаны также с возможным навязыванием климатических ограничений на торговлю и транспорт, что могло нарушить принцип «общей, но дифференцированной ответственности». Так, решение 2/CP.3 определяло именно методологические рамки (как считать и куда вносить данные в кадастрах). Передача переговоров по существу, т. е. право устанавливать ограничения и регулировать эти выбросы, была закреплена непосредственно текстом Киотского протокола (статья 2.2)², который был принят параллельным решением 1/CP.3: «Стороны, включенные в Приложение I, стремятся к ограничению или сокращению выбросов парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, в результате использования бункерного топлива при воздушных и морских перевозках, действуя соответственно через Международную организацию гражданской авиации и Международную морскую организацию».

Обсуждение вопроса о выбросах от международного бункерного топлива в рамках РКИК ООН приобрело исключительно процедурный (методологический) характер сразу после принятия Киотского протокола на КС-3 в декабре 1997 г. Это произошло в силу четкого разделения ролей между структурами, т. е. в национальных кадастрах применяется методология разделения топлива на «внутреннее», которое идет в национальный зачет, и «международное», которое выносится в отдельную строку, а в текущей переговорной работе происходит обмен информацией и заслушивание ежегодных докладов от ИМО и ИКАО о прогрессе в их собственной работе.

Попытки развивающихся стран вернуться к обсуждению «по существу» (например, привязать выбросы судов к принципу «общей, но дифференцированной ответственности» развитых и развивающихся государств) регулярно блокируются со ссылкой на то, что у РКИК ООН по этому вопросу остался только процедурный мандат, т. е. по итогам рассмотрения пункта повестки дня принимается стандартное процессуальное заключение: «ВОКНТА принимает к сведению информацию, представленную секретариатами ИКАО и ИМО». Таким образом, ВОКНТА юридически подтверждает, что РКИК ООН признает исключительную компетенцию этих ведомств в регулировании бункерного топлива. Орган не дает им прямых указаний, не утверждает их внутренние программы (такие как цели ИМО по декарбонизации) и не интегрирует их напрямую в национальные обязательства стран.

¹ Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата: [принята в г. Нью-Йорке 09.05.1992] // Организация Объединенных Наций: [официальный сайт]. URL: unfccc.int (дата обращения: 09.08.2026).

² Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата: [принят в г. Киото 11.12.1997] // Организация Объединенных Наций: [официальный сайт]. URL: unfccc.int (дата обращения: 09.08.2026).

Практика, при которой ВОКНТА в рамках климатических сессий ООН лишь формально принимает к сведению поступающие доклады ИКАО и ИМО без открытия содержательных переговоров по существу, окончательно закрепилась с 48-й сессии ВОКНТА, проходившей в мае 2018 г. в Бонне, на которой председатель ВОКНТА сразу предложил проект заключения, который лишь констатировал факт обмена информацией с ИКАО и ИМО. Попытки ряда развивающихся стран (например, Габона от имени Африканской группы) выразить протест против отсутствия предметных дискуссий по бункерному топливу были отклонены, поскольку мандат на регулирование этих секторов был полностью делегирован самим ИКАО и ИМО. При этом развитые государства (в первую очередь ЕС) настаивают на более жесткой интеграции международных транспортных эмиссий в глобальные климатические цели, однако во избежание процедурных блокировок в повестках дня используют стандартную формулировку: «принять к сведению». Таким образом, пункт повестки ВОКНТА под названием «Выбросы в результате использования топлива для международных авиационных и морских перевозок» превратился в сугубо техническую процедуру, исключая реальность переговоров внутри РКИК ООН.

Руководящие принципы Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) по подготовке кадастров ПГ, руководящие принципы РКИК ООН по представлению ежегодных кадастров для Сторон, включенных в Приложение I к Конвенции, а также Порядок, процедуры и руководящие принципы для рамочной программы действий и поддержки, упомянутой в статье 13 Парижского соглашения, предусматривают, что выбросы от международной авиации и морского транспорта должны учитываться в национальных кадастрах парниковых газов Сторон, но исключаться из национальных сумм и представляться отдельно, т. е. эти выбросы не подпадают под обязательства по ограничению и сокращению выбросов Сторон Приложения I в рамках Конвенции и Киотского протокола.

Секретариат РКИК ООН поддерживает тесные связи с секретариатом ИМО. Сотрудничество между тремя организациями основано на эффективном взаимном обмене информацией. В рамках ВОКНТА секретариат ИМО постоянно предоставляют отчеты и информацию о работе, имеющей отношение к международным выбросам бункерного топлива. Организуются специальные совещания экспертов для обсуждения методологических вопросов, касающихся оценки, сбора и представления данных о выбросах парниковых газов в международном авиационном и морском транспорте.

Методы и материалы (Methods and materials)

Литературный обзор моделей учета выбросов парниковых газов с судов

Как часто происходит в практике принятия решений в ИМО, этому процессу предшествует этап накопления опыта. В период 2000–2020 гг. были выполнены четыре исследования ИМО по выбросам ПГ с судов [2–5] и в настоящий момент выполняется пятое исследование, техническое задание на которое было утверждено на КЗМС 84³, а само исследование «увидит свет» в 2027 г.

В статье [6] показано, что нормативные инструменты ИМО (EEDI, EEXI, CII) имеют принципиальные ограничения: они не измеряют реальные выбросы с судов, а рассчитывают удельные показатели на основе проектных данных (EEDI, EEXI) и данных судовладельца (CII), не имеют географической привязки и непригодны для контроля в зонах выбросов или национальных кадастров.

Дополнительно следует отметить так называемые *упрощенные факторные модели* определения выбросов на основе транспортной работы [7–10]. Альтернативой этим методам выступают динамические методы на основе данных АИС, которые позволяют объективно, непрерывно и с пространственной детализацией оценивать выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ, а также выполнять внешний аудит самодекларируемой отчетности.

³ MEPC 84/WP.8/Rev.1. REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS. Draft report of the Working Group on Reduction of GHG Emissions from Ships. 11 May 2026.

Первое исследование ИМО 2000 г. строилось на агрегированных данных о продажах bunkerного топлива и усредненных коэффициентах эмиссии, что порождало значительные неопределенности и не позволяло увидеть реальную картину выбросов с привязкой к конкретным судам, маршрутам и режимам работы. Ситуация изменилась с середины 2000-х гг., когда в поле зрения исследователей и регуляторов попала АИС [2]. Изначально АИС рассматривалась исключительно как инструмент навигационной безопасности. Однако уже к 2007 г. в документах ИМО стали появляться первые предложения по ее использованию для экологических целей⁴. В частности, в исследованиях для Балтийского моря⁵ данные АИС начали применять для определения скорости, маршрута и режима работы судов, что позволило рассчитывать мощность двигателей и объемы выбросов NOx с беспрецедентной для того времени детализацией. Параллельно рассматривались возможности использования АИС для верификации маршрутов судов⁶ и косвенной оценки расхода топлива в системах торговли квотами на выбросы ПГ.

Настоящим прорывом стало второе исследование ИМО по парниковым газам 2009 г. [3]. Впервые данные АИС были использованы для построения глобальной карты судоходства и создания полноценной инвентаризации выбросов на основе фактического движения судов, так называемого «восходящего» (bottom-up) подхода. Это позволило отказаться от усредненных статистических оценок и перейти к расчетам, учитывающим реальные траектории, скорость и загрузку каждого судна. Революционность этого шага трудно переоценить: по сравнению с первым отчетом 2000 г., в котором АИС даже не упоминалась, новая методология открыла возможность анализировать выбросы не в абстрактных тоннах, а в привязке к конкретным районам, сезонам и типам судов.

В последующие годы использование АИС в документах ИМО только получило широкое распространение. К 2012–2013 гг. система стала стандартным инструментом для решения специализированных задач: мониторинга скорости в рамках программ регулируемого медленного хода⁷ [11], оценки выбросов черного углерода в Арктике⁸, уточнения методологии глобальных инвентаризаций. На экспертном семинаре 2013 г. АИС была признана ключевым источником данных для «восходящего» подхода⁹, а ведущие исследовательские центры (EMSA, UCL) представили конкретные модели ее применения.

Наконец, к 2014–2016 гг. АИС стала неотъемлемой частью всех крупных исследований ИМО. В третьем исследовании по парниковым газам ИМО [4] были использованы спутниковые и береговые данные АИС для почасового расчета выбросов каждого судна за период 2007–2012 гг., что позволило анализировать долгосрочные тренды, такие как распространение практики slow steaming. Одновременно АИС стала основой для расчета энергетического эксплуатационного операционного индикатора (ЕЕОИ), оценки эффективности мер по снижению выбросов и моделирования будущих сценариев.

В России на базе ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова разрабатывается собственное программное обеспечение для анализа АИС-данных, которое может применяться для оценки углеродного следа судов в Финском заливе и Балтийском море с учетом реальных условий плавания [12].

⁴ MEPC 57-INF.5. Emission Trading for Sulphur and Nitrogen Oxides – Means to green maritime shipping (Sweden).

⁵ MEPC 57-INF.14. Information on NOx Emissions from Shipping in the Baltic Sea Area (Denmark, Estonia, Finland).

⁶ MEPC 58-4-4. Updated 2000 Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships Phase 1 Report - Executive Summary... (Secretariat).

⁷ MEPC 64/INF.14. Smarter Steaming Ahead Policy options, costs and benefits of regulated slow steaming, Clean Shipping Coalition (CSC), Smarter Steaming Ahead: Policy options, costs and benefits of regulated slow steaming, 26 July 2012.

⁸ MEPC 65/4/22. Emissions of Black Carbon from shipping inside and outside the Arctic, Norway, 8 March 2013.

⁹ MEPC 65/5/2. Report of the Expert Workshop on the update of GHG emissions estimate for international shipping (Update-EW), Secretariat, 4 March 2013.

Таким образом, за менее чем десятилетие АИС прошла путь от вспомогательного инструмента верификации до фундаментальной основы современной методологии оценки выбросов парниковых газов в судоходстве. Ее внедрение позволило перейти от усредненных статистических оценок к высокоточному почасовому учету активности каждого судна, что кардинально повысило надежность глобальных инвентаризаций и создало основу для разработки эффективных мер по декарбонизации морского транспорта. Сегодня данные АИС являются «золотым стандартом» для всех ключевых исследований ИМО, включая Четвертое исследование по парниковым газам 2020 г. [5] и текущие работы по оценке эффективности климатической политики в судоходстве [11, 13–19].

Ретроспективное исследование развития методологии для учета выбросов парниковых газов с судов

Работа по учету выбросов парниковых газов с морских судов началась достаточно давно, в начале 90-х гг. XX в. С самого начала стало очевидно, что единого способа снизить выбросы парниковых газов с судов не существует и вряд ли появится в будущем, а мировое судоходство является сферой пересечения интересов многих заинтересованных сторон, поэтому без комплексного изучения данной проблемы с учетом понимания не только совокупных выбросов, но и их происхождения (географического, технического) невозможна выработка гармоничных, научно-обоснованных и целенаправленных мер по их сокращению. На основе проведенной за последние 35 лет работы можно выделить несколько основных этапов развития моделей для учета выбросов ПГ с судов (табл. 1). Рассмотрим их подробнее.

Таблица 1

Основные этапы развития моделей для учета выбросов ПГ с судов

Table 1

Main Stages in the Development of Models for Accounting for GHG Emissions from Ships

Этап	Годы	Название этапа	Методика
1	1999–2005	Эпоха накопления опыта, статистики и ранние модели	Нисходящая, восходящая, экспертная (региональная)
2	2006–2009	Первые модели, использующие АИС на локальном уровне	STEAM 1.0 и ее верификация методами LRIT.
3	2010–2014	Глобальный охват — спутниковый АИС и масштабирование	STEAM 2.0, 3.0, Глобальная восходящая методология, Гибридные методы и Модели химического переноса (SILAM)
4	С 2014 г. по настоящее время	Современность — интеграция с климатическими сценариями и мониторингом	IMO DCS / EU MRV, TFT (прогнозирование)

Этап 1. Эпоха накопления опыта, статистики и ранние модели в период с 1990 по 2000 гг.

В этот период появились первые представления о методологиях учета выбросов, появились два фундаментальных подхода, по сей день существующих, развивающихся и взаимодополняющих друг друга. На основе этих методологий были выполнены самые первые оценки выбросов ПГ морских судов, основанные на макроэкономических показателях и «среднестатистических» судах. Это *нисходящие* (*Top-down*) и *восходящие* (*Bottom-up*) методологии учета выбросов.

1.1. Нисходящая методология (*Top-down*). В нисходящих (*Top-down*) методологиях учета выбросов оценка выбросов ПГ в атмосферу морских судов выполнялась на основе данных о продажах бункерного топлива (IEA, EIA) по странам. Общий тоннаж реализованного бункерного

топлива умножался на усредненные коэффициенты эмиссии ($\text{CO}_2/\text{тонну топлива}$) для каждого типа топлива. Такой подход использовался в первом исследовании ИМО по выбросам парниковых газов с судов [2] (рис. 1), а также учитывался в отчетности стран по UNFCCC¹⁰.

Так, в первом исследовании ИМО [2] в качестве основного метода определения количества выбросов судов мирового флота за 1996 год использовался топливно-статистический метод (нисходящая методология). Входные данные содержали количество потраченного судового остаточного и дистиллятного топлива судами мирового флота за несколько предыдущих лет (1990, 1992–1995) и были получены от Норвежской морской академии (NSA), CONCAWE, Управления энергетической информации США (IEA) и Международной ассоциации бункеровщиков (IBIA). В результате обработки данных о количестве потраченного бункерного топлива оказалось, что разные источники дают разные значения о количестве потраченного топлива, что потребовало дополнительного уточнения данных.

В исследовании были рассмотрены следующие парниковые газы: оксиды азота (NO_x), серы (SO_2), двуокись углерода (CO_2), угарный газ (CO) и неметановые летучие органические соединения (НМЛОС). Формула определения количества выбрасываемых ПГ представляет собой произведение массы потраченного топлива на эмиссионный фактор каждого ПГ с учетом доли ПГ в выхлопных газах и доли рассматриваемого типа топлива в общем количестве реализованного бункера:

$$M_g = B \cdot \sum_{i=1}^n \left(E_{i(g)} \cdot \alpha_i \cdot \text{ПГП}_i \right), \quad (1)$$

где коэффициент i (1...3) в зависимости от ПГ (для NO_x — тип главного двигателя ($i = 1, 2, 3$); для SO_x — тип топлива ($i = 1, 2$); для CO_2 , CO и НМЛОС — тип топлива (1, 2));

M_g — масса выбросов компонента g , кг;

B — годовое потребление топлива, кг;

$E_{i(g)}$ — эмиссионный фактор (кг загрязняющего газообразного вещества или парникового газа / кг топлива) для категории i ;

α_i — доля категории i в общем потреблении или установленной мощности;

ПГП_i — потенциал глобального потепления для пересчета массы выбросов в эквивалент диоксида углерода ($\text{CO}_{2\text{-экв}}$).

К числу ограничений данной методики можно отнести оценочное распределение типов судов и их главных двигателей (i) в мировом флоте морских судов, плохую сходимость данных о количестве потраченного бункерного топлива (B), полученных из разных источников, всего два типа используемого топлива (остаточное и дистиллятное), соотношение которых также являлось объектом дополнительного уточнения в тексте исследования. Кроме того, необходимо отметить, что выбросы в данной методике не приводились к CO_2 -эквиваленту, а указывались в натуральном массовом выражении.

К положительным сторонам данного метода можно отнести широту охвата парниковых газов, простоту вычислений и быстроту выполнения самого исследования. Все это в совокупности приводит к низкой точности исследования; данный метод не может использоваться для региональных оценок выбросов парниковых газов, так как количество реализованного в регионе бункерного топлива не равно количеству использованного топлива в данном регионе. Рассматриваемую проблему практически невозможно решить при помощи модели географического распространения бункерного топлива и связанных с ними выбросов, так как для ее реализации необходимо иметь актуальные данные об общей мировой картине потребления топлива и актуальную информацию о распределении выбросов парниковых газов. Использование данного метода целесообразно для внутренних акваторий, или, например, Каспийского моря.

¹⁰ FCCC/IDR.3/RUS Russian Federation. Report on the in-depth review of the third national communication of the Russian Federation. 10 Jun 2004



Рис. 1. Блок-схема нисходящей методологии, реализованной в Первом исследовании ИМО по парниковым газам [2]

Fig. 1. Flowchart of the Top-Down Methodology Implemented in the First IMO GHG Study [2]

1.2. *Восходящая методология (Bottom – Up)*. Одновременно с нисходящими методами, появились восходящие методы, в которых учитывалось уже не количество реализованного топлива, а генеральная совокупность выбросов ПГ от всех морских судов с учетом их технических характеристик и особенностей эксплуатации. Для этого использовались данные относительно существующих типов морских судов мирового флота, количества судов внутри каждого типа и их усредненных характеристик (рис. 2).



Рис. 2. Блок-схема восходящей методологии, реализованной в Первом исследовании ИМО по парниковым газам [2]

Fig. 2. Flowchart of the Bottom-Up Methodology Implemented in the First IMO GHG Study [2]

Данные агрегировались, обрабатывались и предоставлялись классификационными обществами (КО). Для каждого типа судна (наливное, сухогрузное, контейнерное и т. д.) принимались усредненные значения мощности двигателя, годового эксплуатационного фонда, нагрузки на главные и вспомогательные агрегаты на различных режимах, удельный расход топлива и другие необходимые для выполнения расчета характеристики. Выбросы ПГ в атмосферу рассчитывались как сумма всех выбросов от всех судов с учетом их типов, размеров и схемы эксплуатации. Здесь необходимо отметить, что данный метод первоначально носил весьма неточный характер и появился благодаря необходимости проведения процедуры *верификации* выполненных в первом исследовании ИМО по парниковым газам [2] расчетов по нисходящей (Top-down) методологии (п. 1.1), т. е. использовался в качестве *дополнительного* метода.

В качестве исходных данных в исследовании [2] были приняты база данных судов мирового флота Регистра Ллойда за 1996 год¹¹, в которую попали 43 325 транспортных морских судна валовой вместимостью более 100 GT, разделенные по типам (газовозы, танкеры-химовозы, танкеры для перевозки сырой нефти и нефтепродуктов, ро-ро, контейнерные, рефрижераторные и пассажирские), размерам (DW) и типам главного двигателя СЭУ (МОД, СОД, газотурбинный). При помощи выполненной экспертной оценки специалистов DNV и MARINTEK были определены средняя мощность двигателя каждого типа и размера, годовой эксплуатационный фонд и средняя нагрузка ГД. Номенклатура эмиссионных факторов была принята та же, что в нисходящей методологии [2].

Расчеты проводились на трех уровнях детализации: по типу судна I ; по типу судна i и его размеру x ; по типу судна i , его размеру x , и типу главного агрегата s ; в соответствии с уравнением

$$E = \sum_i \sum_x \sum_s (N_{i,x,s} \cdot P_{i,x,s} \cdot LF_{i,x,s} \cdot SFOC_{i,x,s} \cdot EF_g) \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где E — суммарный выброс парникового газа g , кг;

N — число судов;

P — установленная мощность (кВт);

T — годовой эксплуатационный фонд (часов в год);

LF — коэффициент нагрузки;

$SFOC$ — удельный расход топлива, г/кВт · ч;

EF_g — эмиссионный фактор (переводной коэффициент) газообразного загрязняющего вещества или парникового газа / г топлива.

К числу ограничений данной методики можно отнести учет расхода топлива только главными механизмами судовых энергоустановок, использование усредненных параметров (режимов) работы этих механизмов, т. е. отсутствие связи с реальной активностью судов. В модели никак не учитывались данные о фактической скорости, загрузке (грузовой рейс / балластный рейс), осадке и маршрутах движения судов. К числу положительных сторон данного метода можно отнести широту охвата парниковых газов, простоту вычислений и быстроту выполнения самого исследования.

Как и в случае с нисходящей методологией в п. 1.1, все это в совокупности приводит к низкой точности исследования, однако особенности самой методологии позволили планомерно развивать данный подход, как наиболее многообещающий. Главным преимуществом этого подхода стала возможность оценивать региональные выбросы парниковых газов в отдельно взятых акваториях.

1.3. Региональные экспертные модели (MEET, EMEP, EDGAR, MEERI). Целью экспертных моделей было создание базовых инвентаризаций и определения масштабов воздействия судоходства на окружающую среду и для создания основы для будущих нормативов. Таким образом, 1990–2000-е гг. стали временем активного развития и разнообразия экспертных подходов, которые заложили фундамент для современных высокоточных систем мониторинга. Необходимость

¹¹ LMIS, Dataset of Ships 100 GRT or Greater, Lloyd's Maritime Information Services, Stamford, CT, 1996.

пространственной визуализации выбросов ПГ, которую на момент выполнения исследования [2] не могла дать ни нисходящая, ни восходящая модель, привела к созданию региональных экспертных оценок, которые также разделялись на восходящие и нисходящие.

MEET. К восходящему типу региональных моделей относятся модели Регистра Ллойда, которые нашли отражение в трудах исследователя К. Троцци [20] и воплощены в методологии MEET (Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport), реализованной в 1994–1998 гг. (рис. 3).

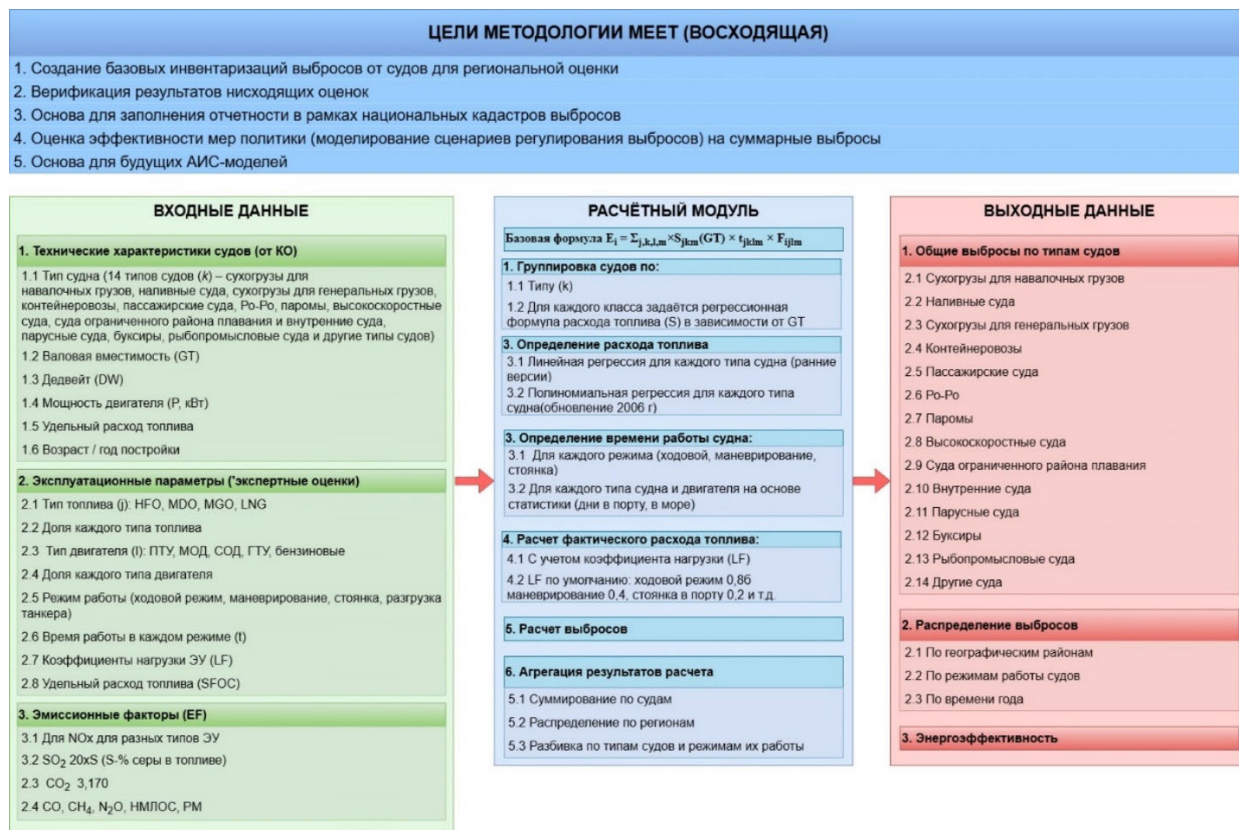


Рис. 3. Блок-схема восходящей методологии MEET [20]

Fig. 3. Flowchart of the MEET Bottom-Up Methodology [20]

Первоначально MEET использовала базу данных по судам в классе Регистра Ллойда, содержащую 86 000 судов, из которых было отобрано около 11 000 судов. Из полученной статистики были выделены четыре типа топлива (j): мазут (BFO), дизельное топливо (MDO), морской газойль (MGO), бензин (GF); 14 типов судов (k): сухогрузы для навалочных грузов, наливные суда, сухогрузы для генеральных грузов, контейнеровозы, пассажирские суда, ро-ро, паромы, высокоскоростные суда, суда ограниченного района плавания и внутренние суда, парусные суда, буксиры, рыбопромысловые суда и другие типы судов; восемь типов энергоустановок (l) с соответствующими характеристиками расхода топлива: ПТУ, ВОД, СОД, ГТУ, бензиновые двигатели яхт, навесные бензиновые двигатели яхт, для нефтеналивных судов — потребная мощность судовой ЭУ на разгрузку (дизель-генераторы для привода грузовых электронасосов или паровой котел для приведения в действия паровых грузовых насосов); четыре режима движения судна (m): маневрирование, движение, стоянка в порту, разгрузка наливного судна; валовая вместимость (GT), средний коэффициент выбросов газообразного загрязняющего вещества или парникового газа i от топлива j в энергоустановке l в режиме m; суточный расход топлива топлива j для типа судна k в режиме m как функции от его валовой вместимости GT ($S_{jklm}(GT)$), годовой эксплуатационный фонд типа судна k с двигателями типа l в режиме m (t_{jklm}).

Вычисления выполнялись по следующей формуле:

$$E_i = \sum_{jklm} S_{jklm}(GT) t_{jklm} F_{ijlm}. \quad (3)$$

Для определения суточного расхода топлива для каждого сочетания типа судна и его энергоустановки в модели МЕЕТ использовалась линейная регрессия. Однако в исследовании¹² было отмечено, что в дальнейшем в ходе развития методологии МЕЕТ для этого стали использовать полиномиальные зависимости, при этом полиномиальная регрессия определяла, какая степень полинома описывает зависимость для каждого типа судна, что позволило с большей точностью моделировать расход топлива для судов малых размерений, ранее «выпадавших» из линейных зависимостей. Этот переход сделал модель более гибкой и точной, особенно для судов с малой и средней вместимостью, где линейная аппроксимация давала большие ошибки. Результаты МЕЕТ легли в основу методики определения состава выбросов в национальных кадастрах МГЭИК¹³, схожие подходы были отражены в исследованиях¹⁴ того времени, например [21].

ЕМЕР. В 1990–2000 гг. для оценки региональных выбросов судов широко применялась нисходящая методология. В отличие от восходящей, имитирующей выбросы каждого судна, нисходящий подход оценивал общий объем выбросов на основе макроэкономических показателей, а затем распределял его по регионам. Оценка общего потребления топлива на определялась на основе статистики продаж бункерного топлива, а выполнялась с помощью расчета общих выбросов путем умножения этого объема на усредненные эмиссионные факторы. Заключительным этапом было пространственное распределение (диспергирование) полученной общей массы выбросов по географической сетке.

ЕМЕР (Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe) в то время была институциональной и методологической системой, которая являлась основным инструментом для оценки выбросов судов в Европе и их трансграничного переноса (рис. 4). ЕМЕР была создана в рамках Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (CLRTAP) и к 1990-м гг. представляла собой механизм, объединяющий три компонента:

1. Сбор и стандартизация данных о выбросах от стран-участниц (через Центр по инвентаризации выбросов — CEIP).
2. Моделирование атмосферного переноса загрязнителей на большие расстояния (через Метеорологический синтезирующий центр — MSC-W).
3. Разработку и публикацию методологий расчета выбросов для разных секторов экономики, включая судоходство (через ЕМЕР/EEA Guidebook).

Именно методологическая часть (Guidebook) и стала тем самым «экспертным» инструментом, который активно использовался в тот период. В Руководстве ЕМЕР / ЕЕА были представлены три уровня методологий, различающихся по сложности и точности:

Tier 1 — простой уровень. Здесь оценка выбросов на основе национальной статистики продаж топлива. Общее потребление топлива для судоходства умножалось на усредненные эмиссионные факторы. Tier 1 не давал пространственного распределения выбросов и характеризовался высоким уровнем неопределенности, так как зависел от качества данных о топливе и предположений о типах судов.

Tier 2 — средний уровень. Здесь также использовалась статистика продаж топлива, но с ее разделением по категориям судов. Пространственное распределение осуществлялось с помощью данных о судоходных маршрутах. Неопределенность Tier 2 меньше, чем в Tier 1, но, по-прежнему, значительная из-за несовершенства статистики.

¹² Trozzi, Carlo & Vaccaro, Rita (2006). Methodologies for estimating air pollutant emissions from ships: a 2006 update.

¹³ Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, Часть 4 Мобильное сжигание, 2006.

¹⁴ ЕМЕР/CORINAIR Emission Inventory Guidebook–2006.

Tier 3 — сложный детализированный уровень. Оценка выбросов на основе данных о реальном движении судов. Здесь использовались данные о движении судов и их технические характеристики. Выбросы рассчитывались для каждого судна или маршрута, а затем агрегировались в сетке 50×50 км. Метод требовал больших объемов данных и вычислительных ресурсов.

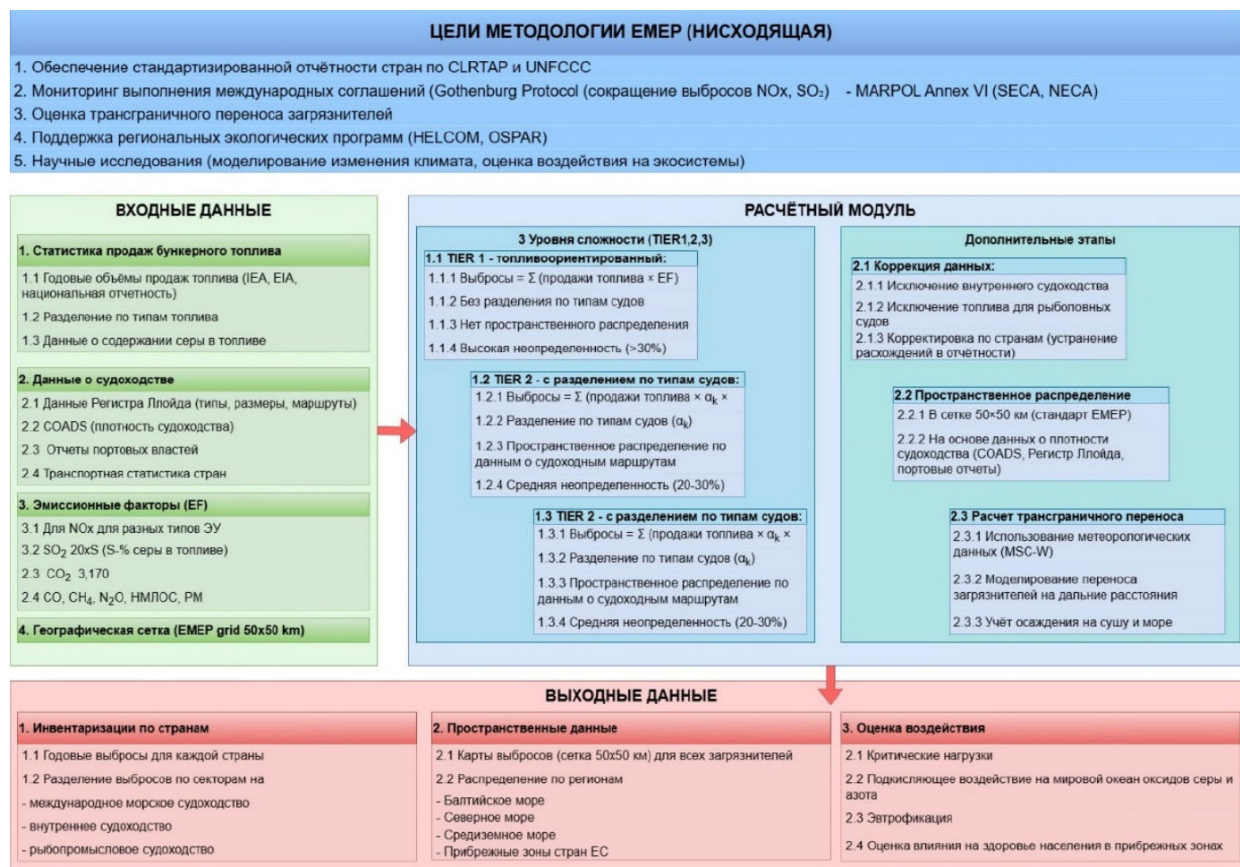


Рис. 4. Блок-схема нисходящей методологии ЕМЕР
Fig. 4. Flowchart of the EMEP Top-Down Methodology

Методологии ЕМЕР активно применялись в крупных региональных исследованиях 1990-х гг., в частности для Средиземного моря [22], где Регистр Ллойда реализовал подход Tier 3. Исследование для Северного моря и Северо-Восточной Атлантики [23], а также оценка осадения азота в Балтийском море [24], где модель ЕМЕР/MSC-W использовалась для расчетов выбросов в период 1995–2006 гг.

EDGAR. В ЕМЕР использовалась статистика продаж топлива из данных Международного энергетического агентства (IEA) и национальных энергетических ведомств. Иногда использовались альтернативные оценки, например из базы данных EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) [25, 26] (рис. 5).

Чтобы распределить выбросы в акваториях, использовались массивы данных о плотности судоходства, например Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS). Программа ЕМЕР разработала стандартизированные методы для составления национальных кадастров выбросов, которые применялись к судоходству, а EDGAR как глобальная база данных использовала нисходящий подход для оценки выбросов на основе общего потребления топлива.

MEERI. Многие страны использовали нисходящий подход для своих региональных оценок. Например, финская система MEERI (Meriliikenteen Päästöjen Laskentajärjestelmä) — это национальная модель для расчета выбросов от водного транспорта, разработанная Техническим исследовательским центром Финляндии (VTT) [27] (рис. 6). Ее данные использовались для отчетности страны по международным обязательствам (CLRTAP, UNFCCC, EU).



Рис. 5. Блок-схема нисходящей методологии EDGAR
Fig. 5. Flowchart of the EDGAR Top-Down Methodology

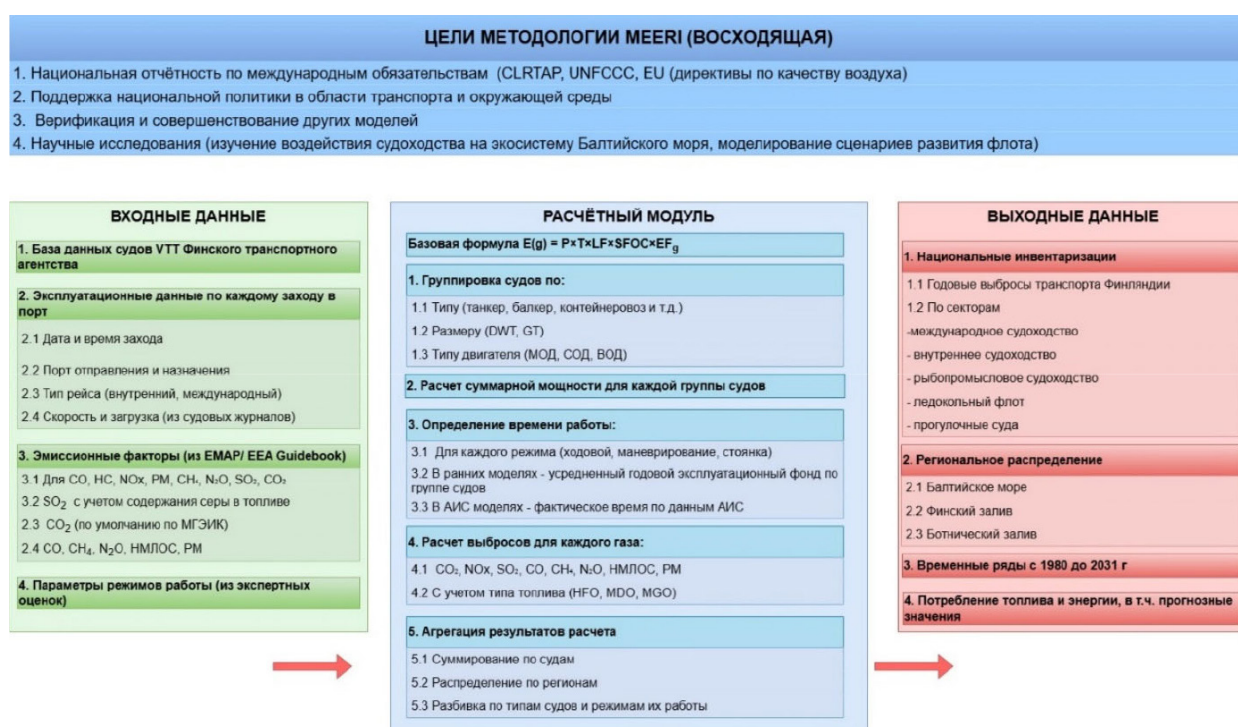


Рис. 6. Блок-схема восходящей методологии MEERI
Fig. 6. Flowchart of the MEERI Bottom-Up Methodology

В отличие от глобальной EDGAR, MEERI была региональной (национальной) экспертной моделью, ориентированной на потребности конкретной страны. MEERI использовала восходящий подход на основе детальных данных о судах и их активности. База данных судов содержала информацию о типе судна, возрасте, размере (GRT), мощности главного двигателя,

скорости, загрузке, портах, маршрутах, типе рейса (внутренний / международный). Финское транспортное агентство вело подробную базу данных по каждому заходу судна в финские порты.

Выбросы в MMERI рассчитывались на основе эмиссионных факторов (г/кВт·ч) из ЕМЕР/EEA Emission Inventory Guidebook, которые различались для двух- и четырехтактных двигателей, а также вспомогательных двигателей. Учитывались типы топлива: HFO, HFO + скруббер, MDO/MGO, дизельное топливо, сжиженный природный газ (СПГ/LNG). Модель рассчитывала выбросы CO, HC, NO_x, PM, CH₄, N₂O, SO₂ и CO₂, а также потребление топлива и энергии. Результаты приводились как на национальном уровне, так и в разрезе отдельных акваторий / портов.

В данной модели учитывалась деятельность транспорта Финляндии, в том числе морского и внутреннего, поэтому она не использовалась для глобальных или общеевропейских оценок. В MEERI использовались статистические данные по судам, а не реальные треки. Здесь использовались факторы выбросов из ЕМЕР/EEA Guidebook, что ограничивало ее точность. Модель обновлялась один раз в год, что не позволяло отслеживать сезонные или краткосрочные изменения трафика и выбросов. Служила основой для национальной отчетности и была частью более крупной системы LIPASTO¹⁵.

Таким образом, в отличие от глобальной EDGAR (нисходящий подход на основе статистики продаж топлива), MEERI была локальной восходящей моделью, ориентированной на детальные данные о финском флоте. Она стала важным инструментом для национальной политики и региональных исследований в Балтийском регионе, но, в отличие от STEAM, так и не стала глобальной.

Этап 2. Переходный период — первые модели, использующие АИС на локальном уровне в период 2006–2009 гг.

2.1. Локальные АИС-модели (HELCOM, OSPAR, STEAM). Ранние модели АИС модели в рамках восходящей методологии показали свою достаточно низкую точность, в основном из-за усредненного показателя годового эксплуатационного фонда судов, использующегося в качестве характеристики операционной активности судна. С окончательным внедрением АИС (2004 г.) большинство морских судов – все пассажирские суда, все транспортные суда вместимостью более 500 и все транспортные суда валовой вместимостью более 300, совершающие международные рейсы, стали оборудованы устройствами АИС. Таким образом, стало возможно накапливать информацию о движении судов в стесненных районах с активным судоходством — в акватории Северного и Балтийского морей. Это связано, в первую очередь, с тем, что первоначально АИС-приемники размещались на береговых станциях, поэтому береговой АИС принимал сигналы в ограниченных пределах прямой видимости (обычно 30–50 морских миль от береговой станции) (рис. 7). Это радикально ограничивало возможности моделей в плане охвата всего флота судов, однако первые модели, показавшие свою точность, были моделями именно этого типа.

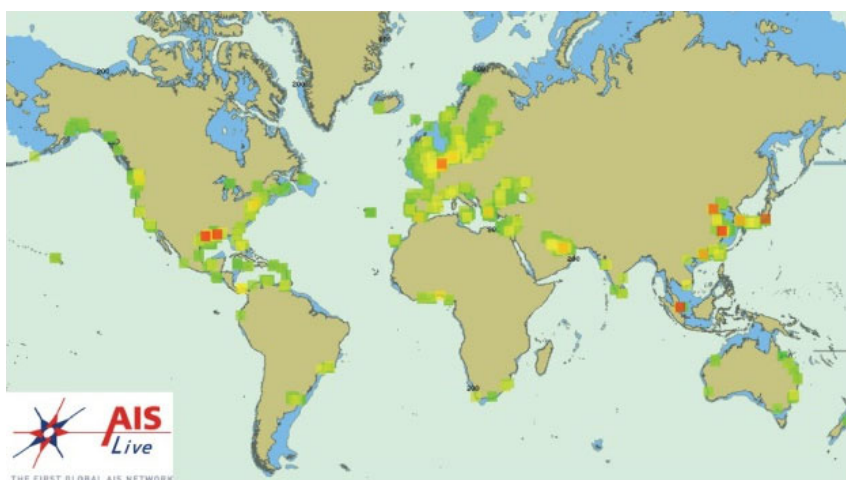


Рис. 7. Карта приемных АИС-станций по данным Регистра Ллойда на 2006 г.

Fig. 7. Map of AIS Receiving Stations Based on Lloyd's Register Data for 2006

¹⁵ Auvinen, Heidi. LIPASTO: Transport Emission Database. 2009.

HELCOM. В рамках Хельсинкской комиссии (HELCOM), отвечающей за защиту морской среды Балтийского моря, уже в 2006 г. началась работа по созданию собственной АИС-модели (рис. 8). Это стало возможным благодаря тому, что Балтийское море стало одним из первых регионов, где была развернута сеть береговых АИС-приемников. Основой для модели послужили данные АИС за 2006–2009 гг., которые позволили с высокой точностью определять местоположение и скорость судов. Модель HELCOM использовала режим работы судна (ходовой режим, маневрирование, стоянка), определяемый по его скорости, получаемой из сигнала АИС. Это позволило впервые перейти от усредненных показателей годового эксплуатационного фонда к динамической оценке активности каждого судна.

Важной вехой стало создание совместного проекта HELCOM STW/AIS/SAT (2007-2008), в котором треки судов из АИС комбинировались с данными спутниковой съемки для улучшения идентификации судов-нарушителей и контроля за разливами нефти. Однако, несмотря на все преимущества, модель HELCOM сталкивалась с проблемой идентификации судов. Как показал анализ за март 2006 г., примерно каждое пятое судно не удавалось надежно идентифицировать из-за отсутствия действительного номера ИМО или ошибок в передаче статических АИС-сообщений. Тем не менее HELCOM стала первой масштабной региональной системой, которая продемонстрировала возможности АИС для экологического мониторинга.

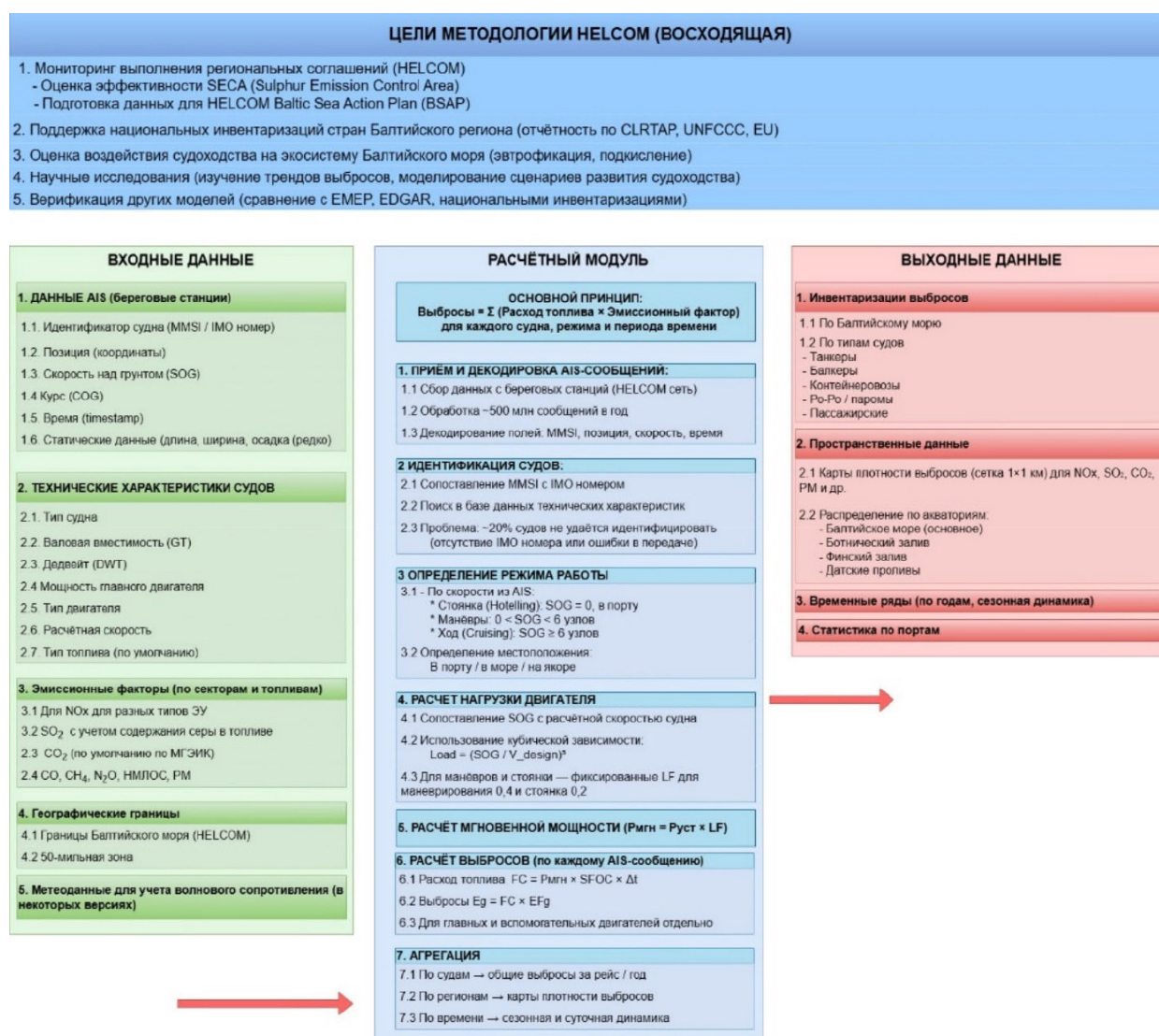


Рис. 8. Блок-схема восходящей методологии HELCOM
Fig. 8. Flowchart of the HELCOM Bottom-Up Methodology

OSPAR. Аналогичный подход был реализован и в регионе Северного моря в рамках Комиссии по защите морской среды Северо-Восточной Атлантики (OSPAR). Начиная с 2006 г., в морских водах Дании была внедрена система АИС, охватывающая все суда валовой вместимостью более 300 GT. Модель использовала те же принципы, что и HELCOM: определение местоположения, скорости и идентификатора судна из сигналов АИС для последующего расчета выбросов (рис. 9). В отличие от Балтийского моря, где модель была более сфокусирована на NO_x, OSPAR уделяла особое внимание также SO_x, учитывая вступление в силу в 2006 г. требований SECA (Sulphur Emission Control Area). Несмотря на меньшую известность по сравнению с HELCOM, модель OSPAR стала важным инструментом для оценки воздействия судоходства на экосистему Северного моря.

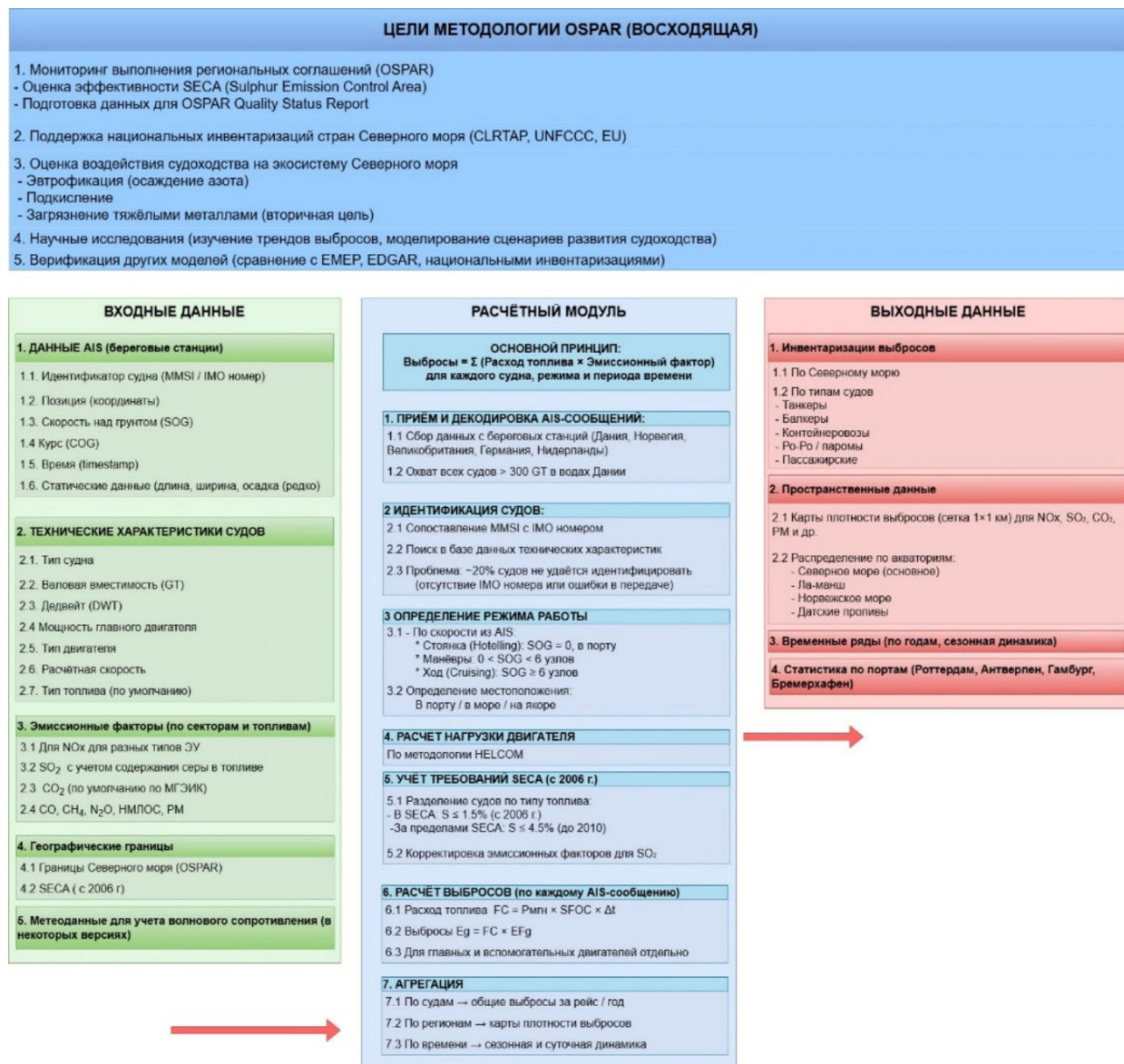


Рис. 9. Блок-схема восходящей методологии OSPAR
Fig. 9. Flowchart of the OSPAR Bottom-Up Methodology

STEAM 1.0. Наиболее значимой разработкой этого периода стала модель STEAM (Ship Traffic Emission Assessment Model), созданная группой исследователей под руководством Юкка-Пекка Ялканена из Финского метеорологического института (FMI) [28]. Официально модель была представлена в 2009 г. и стала важным шагом вперед по сравнению с существовавшими региональными моделями. Она работала на основе данных АИС HELCOM, собираемых с береговых станций стран Балтийского региона.

В эпоху берегового АИС были доступны ограниченное количество данных. К числу агрегируемых данных АИС относились: координаты судна (в пределах охвата береговых станций), скорость над грунтом (SOG), осадка (часто отсутствовала или была некорректной), идентификатор судна (MMSI, IMO номер).

Получение расхода топлива каждого судна невозможно без наличия его характеристик, получаемых из технических баз данных судов (HIS Fairplay, Lloyd's Register). К числу технических данных о судне относились: тип судна, валовая вместимость, дедвейт, мощность главного двигателя (MCR), тип и возраст двигателя (Tier I, II, позже Tier III), расчетная скорость (design speed), данные из портовых и судовых отчетов (для верификации).

В основе STEAM лежал тот же принцип, что и в моделях HELCOM и OSPAR — использование АИС-сообщений для идентификации и позиционирования судов (рис. 10). Однако, в отличие от HELCOM и OSPAR, STEAM предлагала значительно более детальную методологию расчета,

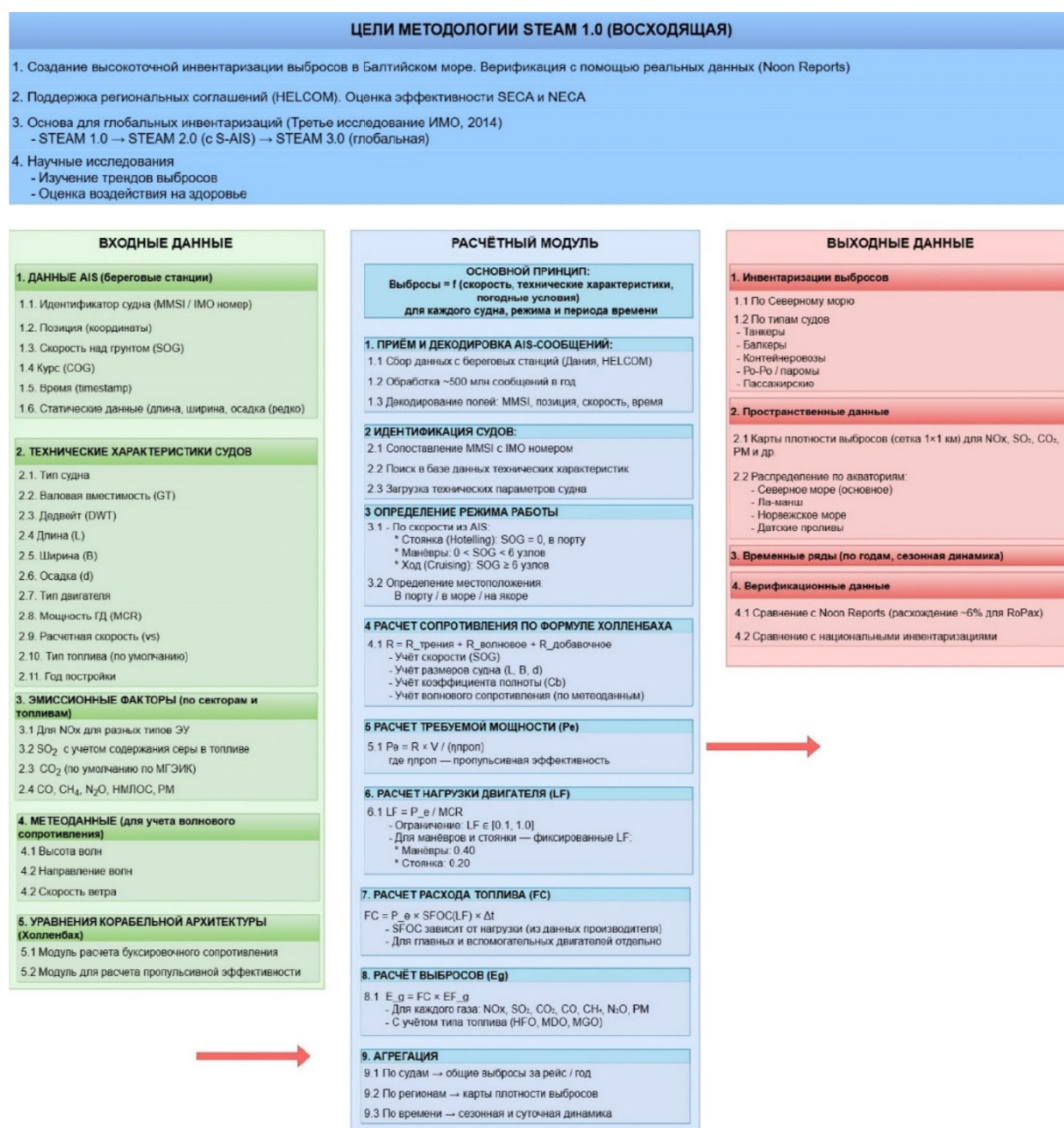


Рис. 10. Блок-схема восходящей методологии STEAM 1.0
Fig. 10. Flowchart of the STEAM 1.0 Bottom-Up Methodology

основанную на уравнениях корабельной архитектуры для моделирования движущей силы каждого судна в зависимости от его скорости. Ключевым нововведением стало то, что STEAM не просто использовала скорость из АИС, а сопоставляла мгновенную скорость с расчетной скоростью судна с учетом подробной технической информации о двигателях.

Кроме того, в модели STEAM впервые была предпринята попытка учесть влияние волн на расход топлива, что повышало точность оценок в реальных условиях. Модель также автоматически определяла режим работы судна на основе его скорости. Сравнение предсказаний модели с реальными данными, полученными от судовладельцев, показало высокую точность: для одного из судов типа RoPax расхождение составило всего 6 %.

К числу преимуществ STEAM можно отнести:

- высокое пространственное разрешение: позиционирование судов с точностью до нескольких метров;
- автоматизацию расчетов, что позволяло экономить ресурсы при составлении инвентаризаций;
- универсальность методологии может быть применена в любом морском регионе, для которого имелись АИС-данные;

Однако, как и у любой модели на основе берегового АИС, у STEAM были следующие ограничения: охват только прибрежных вод и проблемы с идентификацией судов за пределами действия береговых станций AIS.

Так, модель STEAM, благодаря сочетанию детальной технической информации, уравнений корабельной архитектуры и реальных данных АИС, стала важным шагом на пути к созданию современных глобальных систем мониторинга выбросов. Она явилась основой для последующих версий модели, которые уже использовали спутниковые данные АИС для глобального охвата.

2.2. Модели на основе судовых отчетов (Noon Reports). На данном этапе развития моделей береговой АИС мог терять связь с судном, удалившемся от приемников информации в открытое море. Поэтому для заполнения «пропусков» использовались средние значения из портовой статистики или судовых журналов (noon reports) — рис. 11. В данном случае осуществляется сбор ежедневных записей бортового журнала с судов (расход топлива, пройденное расстояние, осадка).

Основные данные в отчете: позиция судна (координаты); пройденное расстояние за сутки; расход топлива (по каждому типу: HFO, MDO и т.д.); остатки топлива в танках на начало и конец суток; скорость судна; осадка (для оценки загрузки); погодные условия (ветер, волнение); режим работы (ход, маневры, стоянка).

Главная роль моделей на основе судовых отчетов в контексте развития моделей учета выбросов — это верификация (проверка точности) расчетов, выполненных с помощью AIS-данных.

Данные модели обладают несколькими важными достоинствами. Так, например, отчеты ведутся на судах в течение многих десятилетий, что дает массив исторических данных. Также данные модели хорошо детализированы и содержат информацию о расходе каждого типа судового топлива, а данные, подтвержденные судовым журналом, считаются эталоном для проверки косвенных методов.

Главным недостатком является то, что данные вносятся вручную, что создает риск ошибок, опечаток и намеренных искажений. Помимо этого низкая частота дискретизации (одна запись в сутки) недостаточна для анализа динамики в режиме реального времени.

Оценка погодных условий или режима работы также может быть необъективной, и отчеты могут содержать пробелы необходимой информации.

Этап 3. Глобальный охват — спутниковый АИС и масштабирование (2010–2014 гг.)

3.1. Глобальные АИС-модели с полной диспетчеризацией (2012–2014 гг.). Появление спутникового АИС (S-AIS) позволило осуществить сбор информации с судов, находящихся вдали

от базовых приемников в практически любой точке мирового океана. В данной модели, реализованной, в частности, в третьем исследовании ИМО по выбросам парниковых газов с морских судов 2014 г. [4] расчет выбросов производится для каждого судна по часам (а не по среднегодовым значениям). Появилась возможность точного учета режимов работы энергетической установки и потребления топлива (ходовой режим, маневрирование, стоянка, балласт).

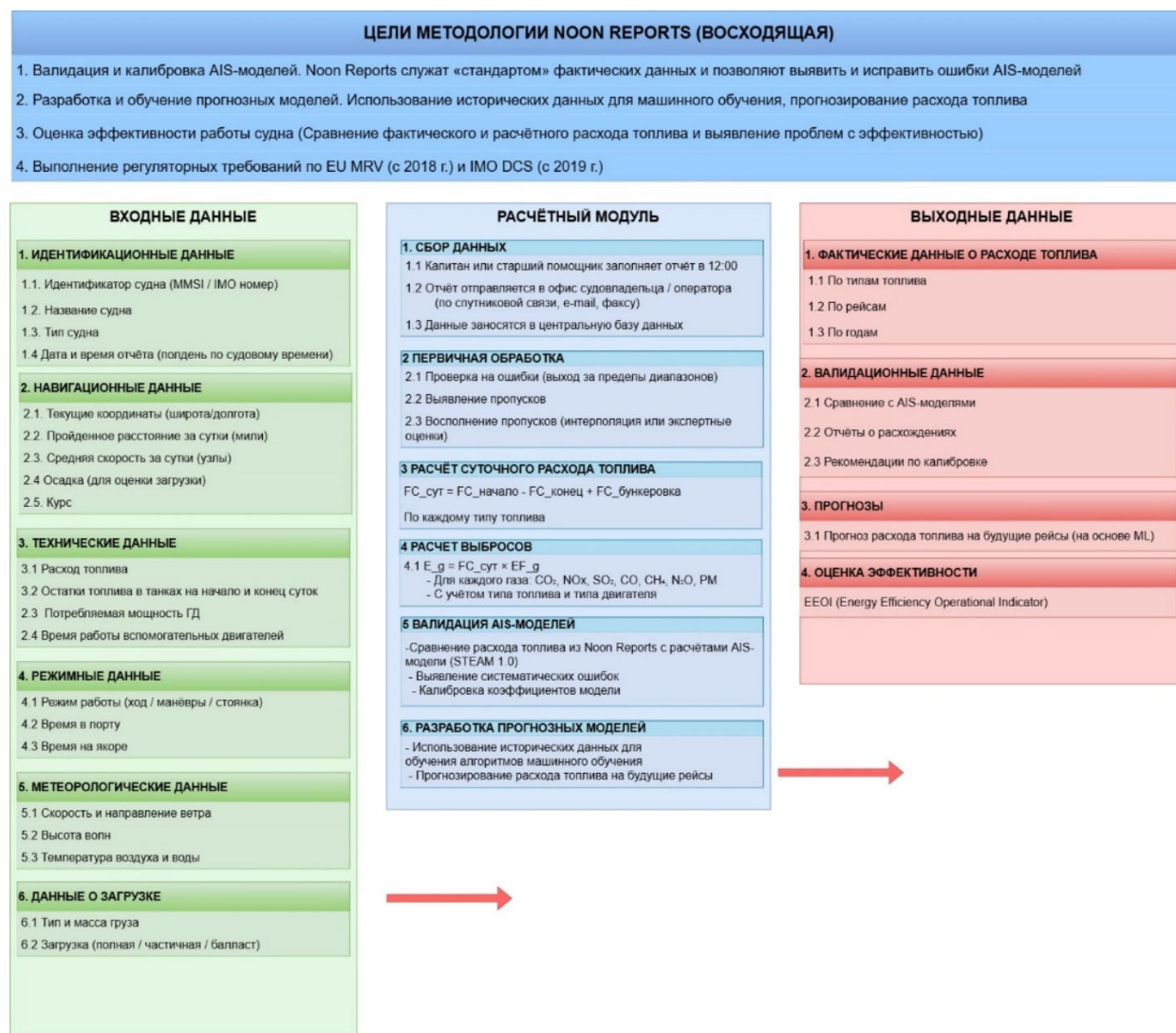


Рис. 11. Блок-схема восходящей методологии оценки выбросов на основе судовых отчетов NOON REPORTS

Fig. 11. Flowchart of the Bottom-Up Emissions Assessment Methodology Based on Ship Noon Reports

STEAM 2.0. Развитие модели STEAM не остановилось на региональном применении. Так, к началу 2010-х гг. стало очевидно, что для глобальной оценки выбросов морского транспорта необходимы данные, выходящие за пределы берегового охвата АИС. В ответ на этот вызов коллектив исследователей под руководством Юкка-Пекка Ялканена из Финского метеорологического института (FMI) представил вторую версию модели — STEAM 2.0, которая была официально описана в работах 2012–2014 гг. [29] (рис. 12). Основным новшеством стал переход от берегового АИС к спутниковому АИС (S-AIS), что позволило охватить не только прибрежные воды, но и открытый океан, включая Арктику и отдаленные районы Южного полушария. Объем обрабатываемых сообщений вырос до 1 млрд в год, а частота обновления позиций достигла 1 минуты для многих судов.

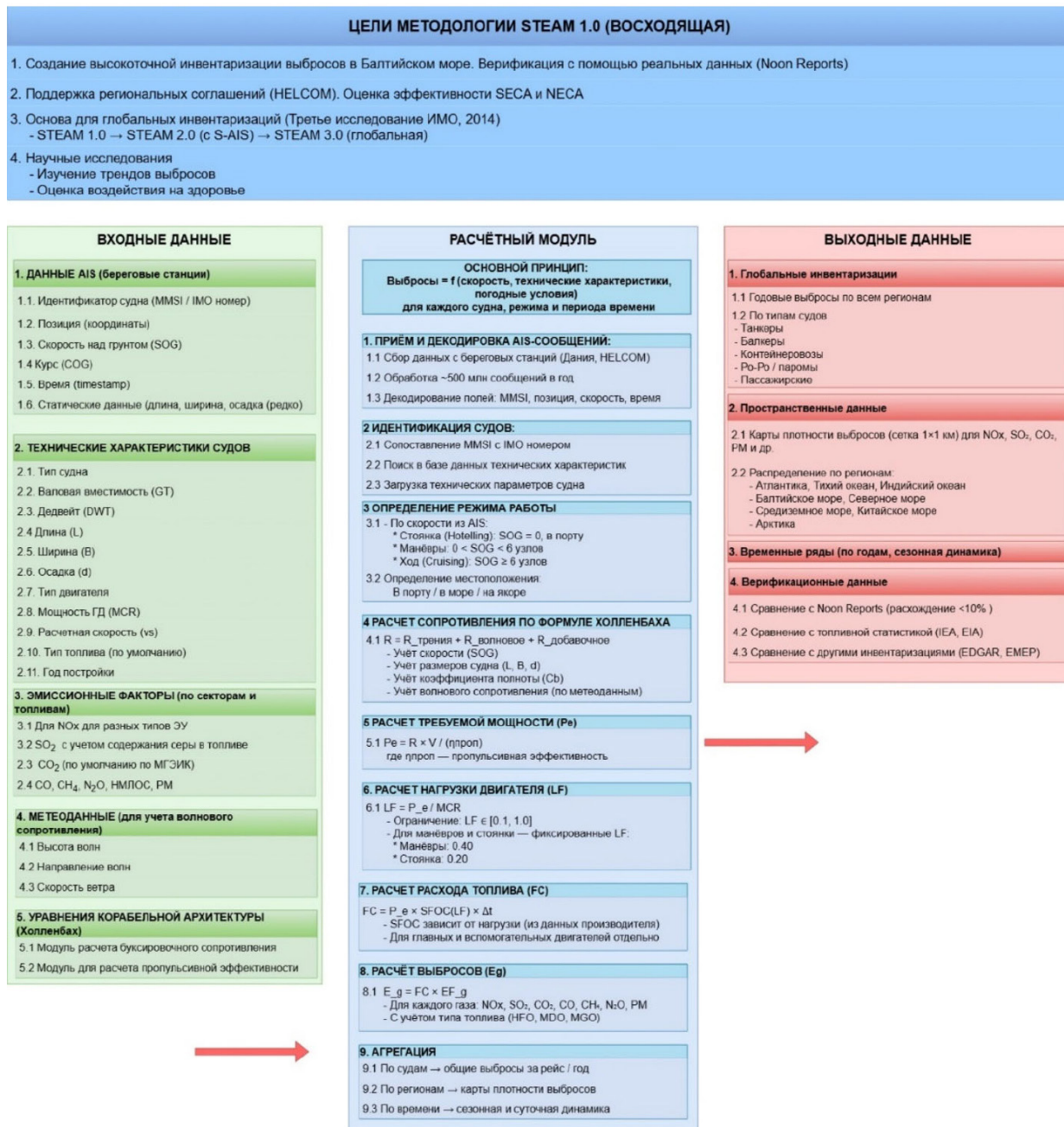


Рис. 12. Блок-схема восходящей методологии STEAM 2.0
Fig. 12. Flowchart of the STEAM 2.0 Bottom-Up Methodology

С расширением географии изменился и набор входных данных. Помимо стандартных полей (MMSI, координаты, SOG, COG, время), в S-AIS стала регулярно передаваться осадка, что позволило точнее оценивать загрузку судна и ее влияние на сопротивление. Технические характеристики судов теперь черпались из глобальных баз данных: IHS Markit, Lloyd's Register, IMO GISIS, а также из классификационных обществ, что повысило процент успешной идентификации судов до 95 % (против ~80 % в первой версии). В модель были интегрированы глобальные метеорологические поля (ECMWF): высота и направление волн, скорость ветра, температура воды, а также данные о ледовом покрове для арктических вод. Кроме того, STEAM 2.0 учитывала работу не только главных и вспомогательных двигателей, но и котлов, что дало более полную картину расхода топлива.

Методологически модель сохранила восходящий принцип, но с существенными усовершенствованиями. Расчет сопротивления судна по формулам Холленбаха теперь дополнялся

поправками на волнение и лед, а также на фактическую осадку. Требуемая мощность (P_e) определялась с учетом пропульсивной эффективности, после чего вычислялась нагрузка двигателя (LF) как отношение P_e к MCR , причем допустимый диапазон был расширен для лучшего отражения работы на малых оборотах. Расход топлива рассчитывался отдельно для каждого режима (ходовой, маневрирование, стоянка), причем для вспомогательных двигателей и котлов применялись собственные зависимости. Важным шагом стала калибровка модели — сравнение предсказаний с реальными данными от судовладельцев (Noon Reports) показало расхождение менее 10 % в целом по флоту, а также было проведено сопоставление с топливной статистикой IEA/EIA и другими глобальными инвентаризациями (EDGAR, EMEP).

Преимущества STEAM 2.0, по сравнению с ее предыдущей моделью, очевидны: глобальное покрытие, учет внешних факторов (волны, лед), более точная идентификация судов и детализация расхода топлива по всем потребителям энергии на борту. Выходные данные — карты плотности выбросов с пространственным разрешением $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ для CO_2 , NO_x , SO_2 , PM , CO , CH_4 , N_2O , $NMVOG$ — стали основой для третьего исследования ИМО [4], а также активно использовались для оценки эффективности SECA и NECA в Балтийском, Северном морях и Арктике. Однако, как и любая модель, STEAM 2.0 имела ограничения: качество результатов сильно зависело от полноты и достоверности глобальных баз данных, а спутниковый АИС все еще давал пропуски в некоторых районах, особенно в высоких широтах. Кроме того, учет технологий снижения выбросов (SCR, scrubbers, LNG) был введен лишь в последующих версиях.

Тем не менее STEAM 2.0 стала важным этапом на пути к глобальному мониторингу судовых выбросов. Она заложила основу для следующего поколения моделей (STEAM 3.0), которые уже интегрировали данные MRV (EU, IMO) и детальные сведения о применяемых природоохранных технологиях, обеспечив переход к высокоточной оценке воздействия морского транспорта на климат и здоровье человека.

STEAM 3.0. Дальнейшее развитие модели было продиктовано потребностью в еще более точных, верифицируемых и детализированных инвентаризациях, способных учитывать быстрое внедрение природоохранных технологий и ужесточение регуляторных требований. Третья версия модели, была представлена в работах, сопровождавших Четвертое исследование ИМО по выбросам парниковых газов (2020) [5, 30]. Она стала логическим продолжением STEAM 2.0, получив ряд кардинальных усовершенствований, превративших ее в полноценную систему глобального мониторинга (рис. 13).

Источники данных остались теми же — спутниковый и береговой АИС (S-AIS) с охватом более 1,5 млрд сообщений в год и частотой до одного сообщения в минуту. Однако теперь к ним добавились данные мониторинга, отчетности и верификации (MRV) по европейскому регламенту (EU MRV, с 2018 г.) и глобальной системе сбора данных ИМО (IMO DCS, с 2019 г.). Эти источники предоставляли фактический расход топлива по каждому судну, что позволило проводить прямую калибровку модели и существенно снизить неопределенность. Помимо этого базы технических характеристик судов были дополнены информацией о наличии систем снижения выбросов — SCR (селективное каталитическое восстановление для NO_x), EGR (рециркуляция отработавших газов), скрубберы (очистка выхлопных газов для SO_2 и PM), а также сведениями о двухтопливных двигателях на сжиженном природном газе (СПГ). Процент успешной идентификации судов превысил 97 %.

Методологическая основа сохранила восходящий принцип и расчет сопротивления по формулам корабельной архитектуры с учетом волнения (ECMWF) и ледовых условий. Однако в STEAM 3.0 появились важные дополнения:

1. Детализированный учет топлива — теперь использовались фактические данные о типе топлива (HFO, MDO, MGO, LNG), его содержании серы (S) и плотности, получаемые из судовых отчетов (BDN — Bunker Delivery Note) и MRV-систем. Это позволило индивидуально корректировать эмиссионные факторы для каждого судна.

2. Расширенный набор эмиссионных факторов: помимо «стандартных» газообразных загрязняющих веществ и парниковых газов (CO_2 , NO_x , SO_2 , CO , CH_4 , N_2O , NMVOC, PM) были добавлены черный углерод (BC) и летучие органические соединения (VOC), что особенно важно для оценки климатического воздействия в Арктике.

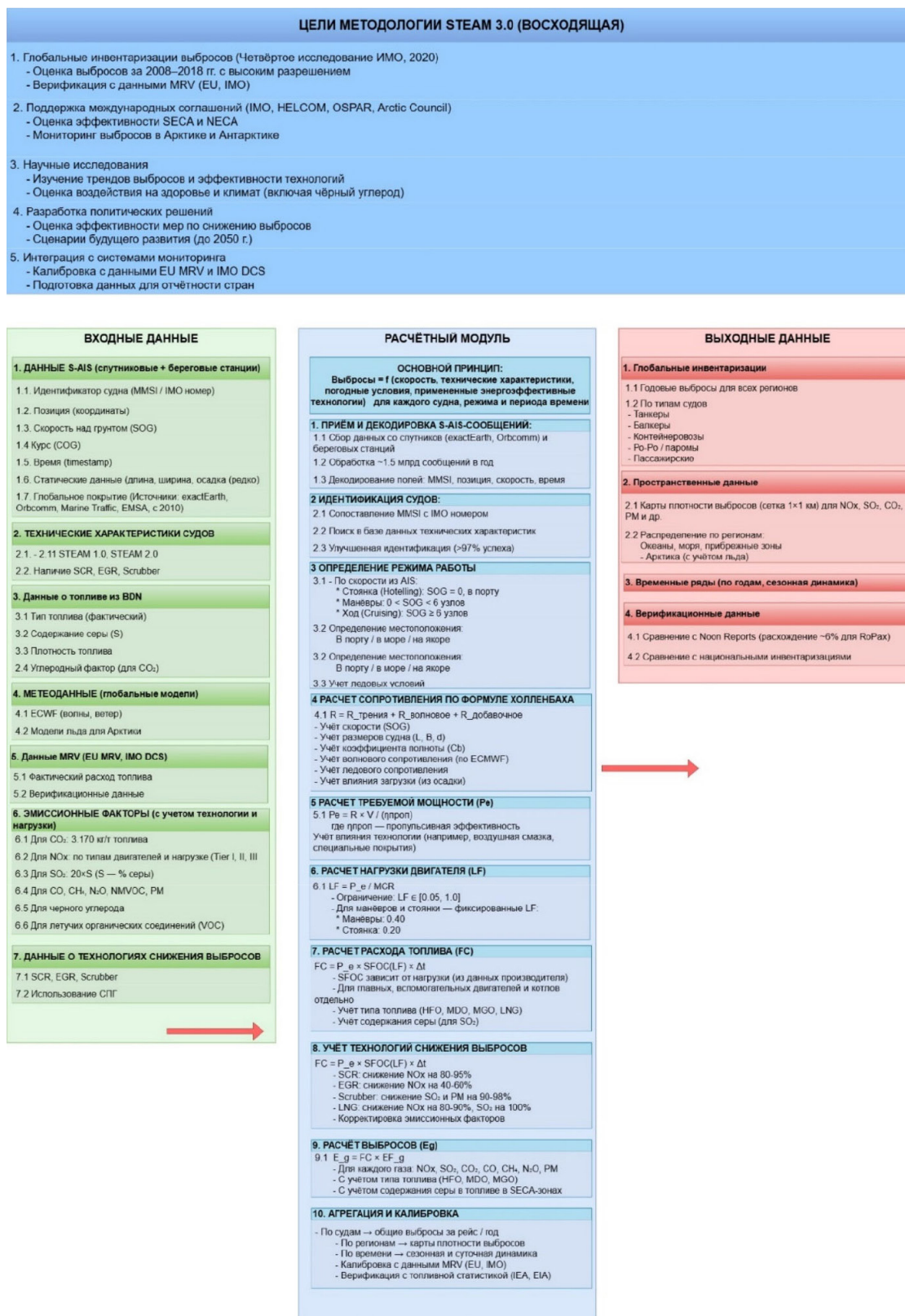


Рис. 13. Блок-схема восходящей методологии STEAM 3.0

Fig. 13. Flowchart of the STEAM 3.0 Bottom-Up Methodology

3. Интеграция технологий снижения — для судов, оборудованных SCR, EGR, скрубберами или работающих на СПГ модель применяла коэффициенты снижения (например, SCR снижает NOx на 80–95 %, скрубберы — SO₂ и PM на 90–98 %, использование СПГ — NOx на 80–90 % и SO₂ — на 100 %).

4. Улучшенный расчет нагрузки двигателя — учитывалось влияние дополнительных потребителей энергии (вспомогательные двигатели, котлы, а также энергопотребление в порту), а диапазон LF был расширен для малых нагрузок.

5. Калибровка и верификация стала многоуровневой: сравнение с Noon Reports, с топливной статистикой IEA/EIA, с данными MRV (EU и IMO) и с другими глобальными инвентаризациями (EDGAR, EMEP). Расхождение с фактическими данными не превышало 5–10 % в зависимости от типа судна и региона.

Выходные данные STEAM 3.0 предоставляют глобальные инвентаризации с пространственным разрешением 0,1°×0,1° или 1 × 1 км для всех указанных газообразных загрязняющих веществ и парниковых газов, а также временные ряды с почасовым разрешением и прогнозными сценариями до 2050 г. Кроме того, модель генерирует показатели энергоэффективности (EEOI) [29] и анализ эффективности регуляторных мер (SECA, NECA, EEDI), что делает ее незаменимым инструментом для оценки экологической эффективности судоходства.

Преимущества STEAM 3.0 очевидны: глобальное покрытие, высокая точность благодаря интеграции MRV-данных, учет всех значимых технологий снижения выбросов и расширенный набор газообразных веществ. Модель стала основой для четвертого исследования ИМО [5] и активно применяется при разработке политических решений, а также для оценки воздействия на здоровье населения и климат.

Ограничения сохраняются: качество выходных данных по-прежнему зависит от полноты и достоверности глобальных баз, а также от регулярности обновления MRV-отчетов. Учет некоторых инновационных технологий (например, воздушной смазки, специальных покрытий) введен, но требует дополнительных эмпирических данных. Тем не менее STEAM 3.0 в настоящее время является одной из наиболее совершенных моделей для оценки выбросов морского транспорта, обеспечивающей баланс между детализацией, глобальным охватом и практической применимостью для регуляторов и научного сообщества.

3.2. *Модели на основе LRIT (Long-Range Identification and Tracking).* В упоминавшемся ранее третьем исследовании ИМО [5] остро встала задача верификации выполненных расчетов из-за неполного покрытия спутниками пространств мирового океана, а соответственно, и эксплуатирующихся в «серых» зонах судов. Параллельно с развитием моделей, использующих АИС, в международной практике сформировалось отдельное направление, опирающееся на систему дальнего опознавания и слежения (LRIT), введенную ИМО в 2006 г. в рамках Международной конвенции по охране человеческой жизни на море (SOLAS).

В отличие от АИС, обеспечивающей покрытие с высокой частотой сообщений, LRIT представляет собой глобальную спутниковую систему, обязательную для судов водоизмещением более 300, совершающих международные рейсы. Передача данных происходит через спутниковые каналы (Inmarsat, Iridium) с периодичностью не реже 1 раза в 4–6 ч. Именно эта особенность определила специфику моделей на основе LRIT. В отличие от восходящих моделей, LRIT-модели часто относят к гибридным или квази-нисходящим подходам. Они используют LRIT-данные для восстановления траекторий судов в открытом океане, где береговой АИС недоступен, но при этом объединяют их с техническими характеристиками судов и где возможно — с эмпирическими зависимостями для оценки расхода топлива (рис. 14).

Входные данные LRIT-моделей включают:

- идентификатор судна (IMO номер);
- позицию (широта / долгота) с дискретностью в несколько часов;
- скорость и курс (оцениваются путем интерполяции между точками);
- время передачи (timestamp).

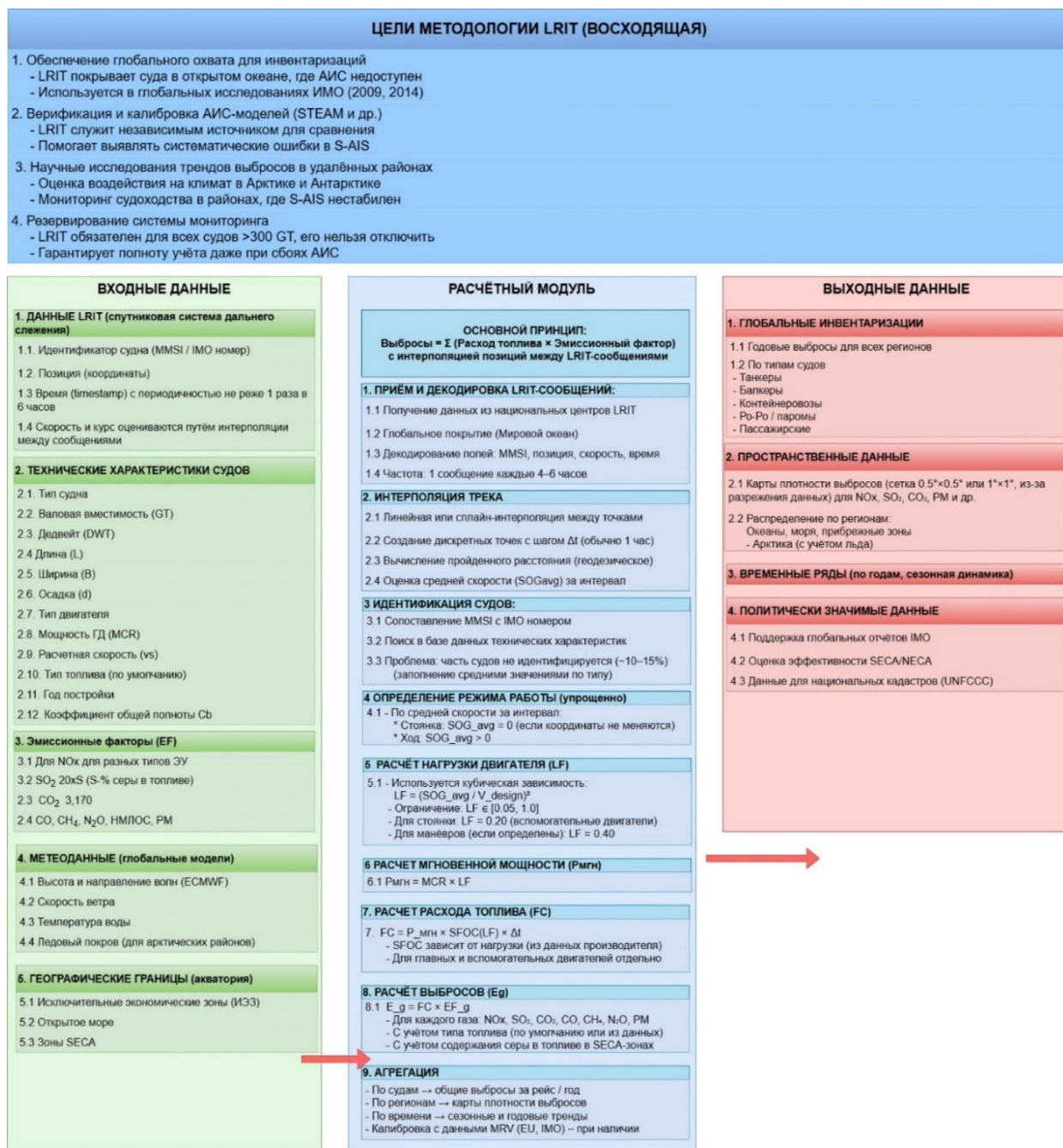


Рис. 14. Блок-схема восходящей методологии LRIT

Fig. 14. Flowchart of the LRIT Bottom-Up Methodology

К этим данным добавляются технические характеристики судов (мощность MCR, тип двигателя, расчетная скорость, дедвейт, год постройки), а также метеоданные (волнение, ветер, течения) для корректировки сопротивления. Однако осадка и другие динамические параметры в LRIT не передаются, поэтому их приходится оценивать статистически или принимать по умолчанию.

Методологически расчет выбросов состоит из следующих этапов:

1. Интерполяция трека — между последовательными LRIT-сообщениями линейно или сплайново восстанавливается положение и скорость судна. Шаг интерполяции обычно составляет 1 ч, что значительно грубее, чем у АИС (минуты).

2. Расчет пройденного расстояния и средней скорости — за каждый интервал вычисляется расстояние и средняя скорость на уровне грунта SOGavg.

3. Оценка мощности двигателя — на основе средней скорости и расчетной скорости судна вычисляется коэффициент загрузки $LF = (SOG_{avg} / V_{design})^k$ (степенной показатель часто принимается равным 3, но может быть скорректирован). Затем мощность $P = MCR \cdot LF$.

4. Расчет суточного расхода топлива $FC = P \cdot SFOC \cdot \Delta t$ (с учетом удельного расхода топлива, зависящего от нагрузки).

5. Расчет выбросов $E_g = FC \cdot EF_g$, где эмиссионные факторы берутся из тех же источников (ЕМЕР/ЕЕА, IPCC), с учетом типа топлива (по умолчанию HFO или MDO, в зависимости от региона).

6. Агрегация по судам, регионам и временным периодам.

Важно подчеркнуть, что LRIT-модели не могут конкурировать по точности с АИС-моделями в прибрежных зонах, но они обеспечивают единственный источник информации о движении судов в отдаленных районах океана, где береговые АИС-станции отсутствуют, а спутниковая сетка редкая. Поэтому они часто применяются в глобальных инвентаризациях, особенно для оценки выбросов в южных морях, Арктике (при наличии LRIT) и для «серых зон», где спутниковый АИС (S-AIS) также может иметь «пропуски».

Преимущества LRIT-подхода:

- глобальное покрытие — все суда, обязанные передавать LRIT, находятся под наблюдением, независимо от удаленности от берега;
- обязательность — суда не могут отключать LRIT, в отличие от АИС, который иногда выключается по желанию экипажа, что повышает полноту учета;
- стабильность данных — передача осуществляется через спутниковые системы с высокой надежностью.

Ограничения и недостатки:

- низкая временная частота — интервал 4–6 ч приводит к потере информации о маневрировании, стоянке в портах, изменениях скорости; средняя скорость интерполируется, что вносит ошибки в оценку нагрузки двигателя;
- отсутствие динамических параметров: осадка, фактическая загрузка, курс (точный) не передаются, это снижает точность расчета сопротивления;
- задержка в получении данных: LRIT-данные предоставляются через центры управления, что часто делает их недоступными для оперативных расчетов в реальном времени (используются для ретроспективных инвентаризаций);
- меньшая детализация: невозможно разделить режимы работы (стоянка, маневры, ход) с такой же точностью, как по АИС, поэтому для портовых зон часто применяются эмпирические поправки.

Модели на основе LRIT использовались при подготовке второго и третьего исследований ИМО как дополнительный источник для валидации глобальных оценок, полученных по S-AIS. В настоящее время LRIT-модели часто комбинируются с S-AIS и данными MRV (EU MRV, IMO DCS) в гибридных системах, где недостающие участки трека дополняются интерполяцией на основе LRIT, а выбросы калибруются по фактическим отчетам судовладельцев. Однако, в отличие от STEAM и подобных моделей, LRIT-подход никогда не претендовал на микро-уровневую точность, его ценность заключается в обеспечении статистической представительности глобального флота и выявлении долгосрочных трендов.

3.3. Гибридные модели, сочетающие нисходящие и восходящие методологии. Данные модели впервые были реализованы в третьем исследовании ИМО [4], где был реализован комбинированный подход, объединяющий элементы нисходящих и восходящих методологий. В то время как восходящие модели (например, STEAM, HELCOM, OSPAR) опираются на детальные данные о каждом судне и его движении (АИС или LRIT), а нисходящие (например, EDGAR) используют агрегированную топливную статистику, гибридный подход стремится использовать сильные стороны обоих методов, компенсируя их недостатки.

Основная идея гибридных моделей заключается в том, чтобы использовать агрегированные данные о продажах топлива (или национальные инвентаризации) для калибровки и проверки результатов, полученных из детальных восходящих расчетов. Например, суммарный расход топлива, рассчитанный по АИС-модели для всех судов в регионе, сравнивается с общим объемом бункерного топлива, проданного в этом регионе. Если обнаруживается расхождение, производится корректировка коэффициентов модели (например, удельного расхода топлива или эмиссионных факторов) таким образом, чтобы агрегированный результат соответствовал статистическим данным. Такой подход позволяет устранить систематические ошибки, возникающие из-за неполной идентификации судов, ошибок в технических характеристиках или пропусков АИС-данных.

Гибридные методологии часто используются в глобальных инвентаризациях, проводимых по заказу ИМО. Например, в четвертом исследовании ИМО [5] применялась калибровка модели STEAM 3.0 по данным о фактическом расходе топлива из систем MRV (EU MRV и IMO DCS) и по статистике Международного энергетического агентства. Это позволило уменьшить неопределенность оценок и повысить их достоверность. Другой пример — методология, используемая некоторыми национальными агентствами для составления отчетов по UNFCCC, где они объединяют данные АИС о движении судов в своих водах с общенациональной топливной статистикой, чтобы распределить выбросы по территории и одновременно согласовать итоговые цифры с энергетическими балансами.

Гибридные модели могут быть реализованы на разных уровнях:

- на уровне отдельных судов: когда расход топлива, рассчитанный по модели сопротивления, корректируется с помощью поправочного коэффициента, полученного из сравнения с фактическими отчетами судовладельцев;
- на уровне флота: когда суммарный расход топлива по всем судам региона «подгоняется» под данные о бункеровке в портах этого региона;
- на глобальном уровне: когда региональные оценки суммируются и сравниваются с мировой статистикой продаж бункерного топлива, после чего вводятся региональные или классовые поправки.

Преимущества гибридного подхода очевидны: он обеспечивает более высокую точность и непротиворечивость на макроуровне, сохраняя при этом детализацию на микроуровне (разрешение по судам, времени и пространству). Кроме того, он позволяет проводить верификацию и постепенное улучшение моделей по мере поступления новых эмпирических данных.

Однако гибридные модели также имеют свои ограничения. Во-первых, они требуют наличия надежных статистических данных, которые не всегда доступны для всех стран и периодов. Во-вторых, процедура калибровки может вносить дополнительные допущения, например о том, что ошибка распределена равномерно между всеми судами, что не всегда соответствует действительности. В-третьих, такие модели сложнее в реализации и требуют более тесного взаимодействия между разработчиками моделей и статистическими службами.

В целом, гибридные модели становятся все более распространенными в международной практике, поскольку они позволяют удовлетворить требования как научной точности, так и практической применимости для политических решений. Они представляют собой разумный компромисс между детализацией и глобальной согласованностью, и, вероятно, будут доминировать в будущих инвентаризациях выбросов от судоходства.

Этап 4. Современность — интеграция с климатическими сценариями и мониторингом (с 2015 г. по настоящее время)

В настоящий момент модели превратились в гибридные системы прогнозирования и верификации.

Экономико-сценарные прогнозные модели. Эти модели представляют собой развивающиеся с 2015 года прогностические инструменты, использующие сценарии МГЭИК (SSP — социально-экономические пути, RCP — траектории концентраций) для прогноза грузопотоков, эффективности флота и изменения структуры потребления энергоносителей в мировом флоте под влиянием различных факторов.

Несмотря на невозможность использования этих моделей для оценки текущей ситуации из-за их прогностического характера, они используются для глобального целеполагания, например в качестве основы модели декарбонизации ИМО [4].

Модели химического переноса и экологического воздействия. Данные модели появились в 2015–2020 гг.

Основной целью их создания являлась интеграция АИС-инвентаризаций с моделями атмосферной химии (SILAM, CMAQ, EMEP). Выбросы CO₂, NO_x, SO_x, сажи (BC) переносятся в пространстве с учетом метеоусловий для расчета реального воздействия на здоровье населения (PM_{2.5}) и климат (радиационное воздействие в Арктике).

Примером такого исследования является исследование влияния отсрочки глобального лимита серы (0,5 %) на смертность¹⁶.

Оба этих типа моделей используются в глобальных целях и мало влияют на облик судна, скорее, они носят прикладной характер для направления инвестиций и принятия политических решений. По этой причине рассматривать их в этом исследовании не целесообразно.

Основные направления развития методик учета выбросов парниковых газов с судов и актуальные научные задачи. На основе ретроспективного анализа, выполненного в статье, можно выделить следующие ключевые тренды, которые сформировались к настоящему времени и будут определять дальнейшее развитие методов учета выбросов.

1. *Переход от усредненных характеристик к индивидуальному моделированию каждого судна.* В первых моделях (MEET, EMEP) использовались среднестатистические параметры (мощность, скорость, нагрузка). С развитием АИС и S-AIS модели STEAM 1–3 перешли к расчету на уровне отдельных судов с учетом их реальной траектории, скорости и осадки.

В качестве направлений дальнейшего развития данной тематики отмечается необходимость учета фактического технического состояния судна — износ двигателя, шероховатость корпуса, состояние винта — через данные, полученные из судовых систем мониторинга (IoT, цифровые двойники [31]). Это позволит корректировать гидродинамические модели сопротивления в реальном времени [20].

2. *Усложнение гидродинамических моделей сопротивления и пропульсии.* В STEAM 1.0 и 2.0 использовались формулы Холленбаха для расчета сопротивления, основанные на классических зависимостях (трение, волновое сопротивление, добавки), которые не учитывают современные конструктивные решения:

- обводы корпуса с носовыми бульбами, скегами, обводы корпуса судов, предназначенных для плавания в покрытых льдом акваториях;
- применение покрытий с низким сопротивлением (фторопласты, силиконовые покрытия);
- воздушная смазка погруженной части корпуса судна (Air Lubrication System) и системы уменьшения трения;
- установка энергосберегающих насадок, направляющих аппаратов, винтов с оптимизированными лопастями.

В качестве направлений дальнейшего развития данной тематики прослеживаются необходимость интеграции в расчетные модели параметров этих устройств на основе их характеристик (коэффициент полезного действия, влияние на сопротивление), что повысит точность оценки требуемой мощности и расхода топлива, особенно в условиях переменной загрузки и погоды [32, 33]. Также отдельным направлением исследований является учет влияния на буксировочное сопротивление «ледовых» обводов судов на чистой воде, выполняемое в том числе российскими исследователями [34]. Также данная тема освещена в отечественных исследованиях [34–37].

3. *Учет влияния загрузки и дифферента судна на буксировочное сопротивление.* В тексте упоминается, что осадка стала регулярно передаваться в S-AIS (STEAM 2.0), что позволяет оценивать загрузку. Однако дифферент и его влияние на гидродинамическое сопротивление пока

¹⁶ MEPC 70/INF.34. James J. Corbett and all, Health Impacts Associated with Delay of MARPOL Global Sulphur Standards, 2016.

не учитываются. Для судов с большим разнообразием грузов (контейнеровозы, балкеры) дифференциал существенно меняет сопротивление, что сказывается на потребной мощности ГД, расходе топлива, соответственно, выбросах ПГ.

В качестве направлений дальнейшего развития данной тематики прослеживаются необходимость разработки эмпирических и полуэмпирических зависимостей для коррекции сопротивления в зависимости от осадки и дифферента, с использованием данных из судовых систем контроля устойчивости и загрузки [38, 39, 40].

4. *Интеграция с системами альтернативных энергоустановок.* Переход на СПГ, аммиак, водород, гибридные и электрические установки требует пересмотра методик учета: изменяются эмиссионные факторы, эффективность преобразования энергии, масса и габариты энергоустановок, а также их влияние на гидродинамику (изменение распределения весов, осадка).

В качестве направлений дальнейшего развития данной тематики прослеживаются необходимость разработки модулей для прогнозных моделей (экономико-сценарных), которые учитывают не только стоимость топлива, но и влияние новой силовой установки на эксплуатационные характеристики судна (скорость, маневренность, запас хода) и связанные с этим выбросы [41, 42].

5. *Верификация и калибровка на основе реальных эксплуатационных данных.* В статье подчеркнута роль Noon Reports и MRV для калибровки моделей. Однако эти данные все еще являются отчетными и могут содержать систематические погрешности. Перспектива — использование непрерывного потока телеметрических данных (расходомеры, датчики мощности, GPS-треки с высоким разрешением). Эти данные позволят калибровать гидродинамические модели не только на уровне судового типа, но и для конкретного экземпляра судна, с учетом его реального технического состояния.

6. *Развитие цифровых двойников для индивидуального учета.* Создание цифрового двойника судна, который включает полную гидродинамическую модель, модель двигателя, модель вспомогательных систем и систему мониторинга расхода топлива, позволит получать виртуальный расход топлива для любого сценария плавания. Такой подход объединяет все упомянутые направления и может быть использован как для инвентаризации, так и для оперативного управления выбросами (оптимизация маршрута и скорости с учетом реального состояния судна и внешних условий) [31].

7. *Учет биологического обрастания корпуса.* Один из важнейших факторов, влияющих на сопротивление, — биологическое обрастание. В существующих моделях оно не учитывается, однако исследования показывают, что обрастание может увеличивать расход топлива до 20–30 %. Разработка методик учета обрастания на основе данных о времени с последнего докования, районе плавания, температуре воды и биологической активности станет значительным шагом в повышении точности оценок.

В итоге, основные направления развития методик учета выбросов в ближайшие годы будут определяться переходом от «статистического» к «индивидуально-гидродинамическому» учету, где корабельная архитектура предоставляет как необходимые параметры (обводы, пропульсивный комплекс, системы снижения трения), так и данные о реальном техническом состоянии судна. Это позволит не только повысить точность инвентаризаций, но и обеспечить их пригодность для оперативного контроля и оптимизации судоходства в реальном времени.

Исходные технические требования к модели учета выбросов парниковых газов с морских судов, актуальные для Российской Федерации. В настоящий момент прослеживается несколько основных методов учета выбросов с водного транспорта: нисходящие расчеты, основанные на расходе судового топлива и восходящие расчеты, основанные на данных судовой системы идентификации (АИС). Обе эти методологии не лишены своих недостатков. Так, методология расчета выбросов на основе расхода топлива значительно зависит от точности учета топлива на судне, а также точности коэффициентов выбросов для каждого типа топлива. К тому же учетная методология не имеет четкой географической привязки и не отражает реальное состояние судна с позиции его энергоэффективности (степень ухудшения буксировочного сопротивления из-за

обрастания корпуса, эффективность использования планировщиков рейсов и других технологий энергоэффективности). Динамический метод, основанные на АИС, классифицирует выбросы в зависимости от различных состояний судна в рейсе, его типа и его характеристик, обеспечивая высокий уровень пространственно-временной детализации. Благодаря внедрению систем навигационной информации, АИС стала незаменимым источником данных об операциях судов в режиме реального времени. Частота передачи данных с других судов позволяет судам получать многочисленные записи АИС с других судов за короткий промежуток времени, что может быть использовано для получения данных о выбросах с высоким качеством данных.

В таблице представлена сводная информация по рассмотренным в статье методикам оценки выбросов ПГ с морских судов, получивших широкое распространение в последние десятилетия.

Методика	Сфера применения	Положительные стороны	Отрицательные стороны
1	2	3	4
Нисходящая (на основе статистики продаж bunkerного топлива (IEA, EIA))	Первое исследование ИМО (2000), отчетность стран по UNFCCC	Простота расчетов, быстрота, глобальный охват, учет всех типов топлива	Низкая точность, недоступна для региональных оценок, расхождения между источниками данных, только два типа топлива, нет географической привязки
Восходящая (на основе усредненных характеристик судов и режимов работы)	Первое исследование ИМО, ранние национальные инвентаризации	Возможность региональной оценки, учет типов судов и двигателей, легла в основу дальнейшего развития	Использование усредненных параметров, нет связи с реальной активностью судов, низкая точность
MEET (региональная, восходящая, экспертная)	Исследования 1994–1998 в Европе	Детализация по типам судов, топливам, режимам	Основана на экспертных оценках, без АИС, ограничена статистикой Регистра Ллойда
EMEP (нисходящая, региональная)	Европа, CLRTAP, исследования Северного, Балтийского, Средиземного морей	Учет трансграничного переноса, первая попытка интеграции с атмосферными моделями	Зависит от качества статистики продаж bunkerного топлива, «грубое» пространственное распределение
EDGAR (глобальная, нисходящая)	Глобальные инвентаризации, климатические модели, IPCC	Глобальный охват, долговременные ряды, сопоставимость секторов	Агрегированные данные, разрешение $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, нет детализации по судам
MEERI (национальная восходящая, Финляндия)	Национальная отчетность Финляндии (CLRTAP, UNFCCC, EU)	Детальные данные по судам и портовым заходам, учет типов топлива и технологий	Только для Финляндии, статичные данные, обновление раз в год
HELCOM (береговая АИС)	Балтийское море (с 2006 г.)	Первая региональная АИС-модель, динамический учет режимов	Ограниченный охват (береговые станции), проблемы идентификации судов
OSPAR (береговая АИС)	Северное море (с 2006г.), воды Дании	Аналогична HELCOM, учет SECA-требований, охват судов >300 GT	Те же ограничения, что у HELCOM

Окончание таблицы

1	2	3	4
STEAM 1.0 (региональная АИС)	Балтийское море, HELCOM	Уравнения корабельной архитектуры, учет волн, высокая точность, автоматизация	Охват только прибрежных вод, проблемы идентификации судов
Noon Reports (судовые отчеты)	Верификация AIS-моделей, калибровка, обучение ML-моделей	Фактические данные, детализация по типам топлива	Ручной ввод (ошибки, искажения), низкая частота (1 раз в сутки), субъективность
STEAM 2.0 (глобальная АИС, S-AIS)	Третье исследование ИМО (2014), глобальные инвентаризации	Глобальное покрытие, учет волн и льда, ~95 % идентификации, учет котлов, верификация с IEA/EIA	Зависимость от глобальных баз, пропуски S-AIS в высоких широтах, нет учета технологий снижения
STEAM 3.0 (глобальная АИС + MRV)	Четвертое исследование ИМО (2020), политические сценарии	Интеграция с MRV-данными, учет SCR, EGR, скрубберов, LNG, черного углерода, калибровка < 5–10 %, прогноз до 2050	Зависимость от полноты MRV-отчетов, сложность, не все технологии учтены
LRIT (спутниковая система дальнего слежения)	Второе и третье исследования ИМО, глобальные инвентаризации в «серых зонах»	Глобальное покрытие, обязательность, стабильность	Низкая частота (4–6 ч), нет осадки и динамических параметров, низкая детализация
Гибридные (Top-down + Bottom-up)	Третье и четвертое исследования ИМО, национальные кадастры	Калибровка по макростатистике, высокая точность и согласованность, верификация	Сложность реализации, допущения о равномерности ошибок, требуется надежная статистика
Экономико-сценарные прогнозные	Исследования ИМО (с 2015г.), разработка стратегий декарбонизации	Оценка трендов до 2050+, учет экономики, технологий, политики, сценарии МГЭИК	Прогностический характер, большая неопределенность, сложность калибровки
Модели химического переноса и экологического воздействия	Оценка воздействия на здоровье и климат (SILAM, CMAQ, EMEP)	Учет переноса, фотохимии, осаждения, оценка PM _{2.5} и радиационного воздействия	Высокая вычислительная сложность, неопределенности в метеоданных и химии, зависимость от инвентаризаций

Для Российской Федерации, с учетом ее географических, экономических и административных особенностей, наиболее востребованной стала бы гибридная модель на основе спутниковой АИС (S-AIS) и LRIT, интегрированная с национальной статистикой топлива и данными Регистра, с дополнительным учетом ледовых условий и гидродинамики для арктических вод.

Россия имеет обширную и протяженную береговую линию, однако береговой АИС покрывает лишь прибрежные зоны, а спутниковый АИС (S-AIS) дает глобальный охват, но в высоких широтах (Арктика) частота сообщений снижается, а некоторые районы остаются «слепыми» из-за технических ограничений. LRIT обеспечивает гарантированное получение позиций с периодичностью 4–6 ч, что позволяет восполнять пропуски. Комбинация S-AIS + LRIT дает максимальную полноту данных, критически важную для контроля судов на Северном морском пути (СМП), где интенсивность судоходства растет, а экологические риски высоки.

В стандартных моделях (STEAM) учет льда уже используется (STEAM 2.0 и 3.0), но для Российской Арктики необходимо углубление подхода для более точного определения расхода топлива судна в ледовых условиях, так как ледовое сопротивление является функцией от большого количества характеристик самого льда, ледовой обстановки и параметров корпуса и пропульсии судна ледового плавания. Модель должна различать режимы проводки судна при движении его по в ледовых условиях (движение за ледоколом, самостоятельное плавание в разреженном льду), с отдельными эмпирическими формулами сопротивления, адаптированными к российским условиям.

Россия предоставляет национальные доклады в РКИК ООН и участвует в ИМО. Для этого необходима модель, которая может выдавать выбросы с разбивкой по национальным водам (внутренние морские воды, территориальное море, ИЭЗ) и международному судоходству. Гибридный подход, где суммарный расход топлива по АИС/LRIT калибруется по данным о продажах бункерного топлива в российских портах (данные Росстата, Минэнерго), позволит согласовать инвентаризацию с энергетическим балансом страны и избежать расхождений, которые возникали в первых исследованиях ИМО.

Российские порты имеют собственную специфику (например, зимняя навигация, использование ледоколов, наличие портов с ограниченной глубиной). Модель должна включать базу данных технических характеристик судов, зарегистрированных под российским флагом или часто заходящих в российские порты, с корректными параметрами (MCR, design speed, тип двигателя, ледовый класс). Было бы полезно интегрировать данные Российского морского регистра судоходства и других классификационных обществ.

Россия обладает протяженной сетью внутренних водных путей. В статье упоминается, что восходящие модели изначально ориентированы на морские суда, но для внутреннего судоходства также необходим учет. Модель должна быть адаптирована к речным условиям (мелководье, ограниченная скорость, маломерные суда). Это можно сделать путем добавления соответствующих эмиссионных факторов и режимов.

Для развития СМП и оценки перспективных грузопотоков необходимы экономико-сценарные блоки, позволяющие моделировать выбросы при различных вариантах освоения Арктики, внедрении альтернативных топлив (СПГ, водород, аммиак) и изменении климата (сокращение льда). Это требует интеграции с глобальными моделями экономики и энергетики, но в масштабе, адаптированном к российским интересам.

Таким образом, наиболее востребованной для Российской Федерации будет модель, сочетающая следующие факторы: S-AIS + LRIT для глобального и арктического охвата; гидродинамический расчет сопротивления с учетом льда, мелководья, дифферента и ледового класса; гибридную калибровку по топливной статистике и данным MRV (если доступны); интеграцию с национальными базами судов и портовыми данными; прогнозный модуль для сценарного анализа развития СМП и внутренних водных путей; пространственное разрешение не ниже 1×1 км для локального контроля и отчетности. Такая модель могла бы стать основой для единой государственной системы мониторинга выбросов от водного транспорта, удовлетворяя как международные обязательства, так и внутренние задачи экологического надзора и стратегического планирования.

Выводы (Conclusions)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В статье исследованы литературные источники по тематике учета выбросов парниковых газов с судов и представленные в них методики.
2. Определены ключевые существующие методики учета выбросов ПГ с судов, их преимущества и недостатки, а также намечены основные направления развития этого научного знания и актуальные научные задачи, подлежащие разработке.
3. На основе выполненного анализа сформулированы исходные технические требования к модели учета выбросов парниковых газов с морских судов, актуальные для Российской Федерации, которые могут быть востребованы в случае создания этой модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриева Т. М.* Об учете Вспомогательными органами Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН) эмиссии парниковых газов при транспортировке бункерного топлива / Т. М. Дмитриева, А. П. Мельникова // Энергетическая политика. — 2006. — Вып. 3. — С. 55–62.
2. International Maritime Organization. Study of Greenhouse Gas Emissions from Ships, Final Report to the International Maritime Organization, Issue no. 2 / International Maritime Organization. — 31 March 2000.
3. *Buhaug Ø.* Second IMO GHG study 2009 / Ø. Buhaug, Corbett [et al.] — London: International Maritime Organization (IMO), 2009.
4. *Smith T. W. P.* Third IMO GHG Study 2014 / T. W. P. Smith [et al.] — London: International Maritime Organization (IMO), 2014.
5. *Faber J.* IMO. Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020 / J. Faber [et al.] — London: International Maritime Organization (IMO), 2020. — 277 p.
6. *Реуцкий А. С.* Использование данных автоматической идентификационной системы для определения углеродного следа от судоходства / А. С. Реуцкий, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 2. — С. 171–189. EDN BBZEUF. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-171-189.
7. The activity-based methodology to assess ship emissions — A review / R. A. O. Nunes, M. C. M. Alvim-Ferraz, F. G. Martins, S. I. V. Sousa // Environmental Pollution. — 2017. — Vol. 231. — Pp. 87–103. — DOI: 10.1016/j.envpol.2017.07.099.
8. *Иванченко А. А.* Прогнозирование и мониторинг безопасности водного транспорта в эксплуатации / А. А. Иванченко // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». — 2018. — № 2. — С. 57–60. — EDN YLTPVZ.
9. *Ложкин В. Н.* Прогнозирование загрязнения воздуха отработавшими газами двигателей судов и автотранспорта / В. Н. Ложкин, О. В. Ложкина // Транспорт Российской Федерации. — 2017. — № 1(68). — С. 59–62. — EDN YHHVKZ.
10. *BenHakoun E.* The daily port and shoreline emission inventory model / E. BenHakoun, E. V. D. Voorde, Y. Shiftan // Maritime Policy & Management. — 2024. — Vol. 51. — Is. 4. — Pp. 588–616. — DOI: 10.1080/03088839.2023.2243486.
11. *Реуцкий А. С.* Анализ положений руководящих принципов ИМО по оценке интенсивности выбросов парниковых газов на протяжении жизненного цикла для всех видов судового топлива / А. С. Реуцкий, В. К. Шурпак, С. А. Толмачев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 14–25. — EDN FBVBVJ.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026664304 Российская Федерация. Автоматизированная система сбора данных для оценки углеродного следа от судоходства / А. С. Реуцкий, Е. О. Ольховик заяв. и патентообл. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова». № 2026664304; заявл. 16.04.2026; опубли. 14.05.2026, Бюл. № 5. — EDN TSZFZL.
13. Оценка последствий возможного введения требований ИМО по декарбонизации / А. О. Березин, А. С. Реуцкий, В. К. Шурпак, С. А. Толмачев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56. — № 2. — С. 39–53. — EDN CKHSXE.
14. *Буянов А. С.* Коэффициент энергоэффективности как инструмент определения углеродного следа от работы морских судов ледовых классов / А. С. Буянов, В. В. Якимов, А. С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72–73. — С. 21–31. — EDN SLDIBJ.
15. *Буянов А. С.* Формирование методологического подхода к процессу определения углеродного следа транспортной услуги с использованием коэффициентов энергоэффективности судна / А. С. Буянов, А. С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70–71. — С. 13–28. — EDN QJIKBC.
16. *Реуцкий А. С.* Оценка влияния типа используемого судового топлива на величину углеродного следа транспортной услуги / А. С. Реуцкий, В. В. Якимов, А. А. Буцанец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 87–95. — EDN ICJSDQ.
17. *Реуцкий А. С.* Определение основных путей реализации климатических проектов на водном транспорте / А. С. Реуцкий, Д. С. Семионичев, А. А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 75. — С. 4–15. — EDN FJOQTC.

18. Реуцкий А. С. Обновление рынка морских судов: внедрение альтернативных топлив и энергоэффективных технологий (EETs) / А. С. Реуцкий, А. А. Буцанец // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»: сборник научных статей национальной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 06–20 октября 2025 года. Том 2. — Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2025. — С. 109–121. — EDN BTQWUP.

19. Реуцкий А. С. Использование данных автоматической идентификационной системы для определения углеродного следа от судоходства / А. С. Реуцкий, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 2. — С. 171–189. — EDN BBZEUF. — DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-171-189.

20. Topaj A. Hybrid cell-wave algorithm for ship routing in ice under spatiotemporal constraints / A. Topaj, O. Tarovik // Ocean Engineering. 2025. — Vol. 326. — Pp. 120863. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.120863.

21. Multi-model simulations of the impact of international shipping on Atmospheric Chemistry and Climate in 2000 and 2030 / V. Eyring, D. S. Stevenson, A. Lauer [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2007. — Vol. 7. — Is. 3. — Pp. 757–780. — DOI: 10.5194/acp-7-757-2007.

22. Marine Exhaust Emissions Quantification Study: Mediterranean. Sea, Lloyd's Register London, UK, 99/EE/7044, 1999.

23. Tsyro S. Estimation of Acidifying Deposition in Europe Due to International Shipping Emissions in the North Sea and the North East Atlantic Ocean / S. Tsyro, E. Berge. // Environmental Coastal Regions Boston: WIT Press, 1998. — Pp. 175–184.

24. Bartnicki J. Atmospheric deposition of nitrogen to the Baltic Sea in the period 1995–2006 / J. Bartnicki, V. S. Semeena, H. Fagerli // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2011. — Vol. 11. — Is. 19. — Pp. 10057–10069. — DOI: 10.5194/acp-11-10057-2011.

25. Emission database for global atmospheric research (Edgar) / J. G. J. Olivier, A. F. Bouwman, C. W. M. V. D. Maas, J. J. M. Berdowski // Environmental Monitoring and Assessment. — 1994. — Т. 31. — № 1. — С. 93–106. — DOI: 10.1007/BF00547184.

26. Olivier J. G. J. Global Emissions Sources and Sinks / J. G. J. Olivier, J. J. M. Berdowski // The Climate System Lisse: A.A. Balkema Publishers, 2001. — Pp. 33–78.

27. Mäkelä K. Suomen vesiliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä MEERI 2000 / K. Mäkelä, A. Tuominen, E. Pääkkönen. — Espoo : VTT Technical Research Centre of Finland, 2001. — (VTT Tutkimusraportti № RTE 1370/01, MOBILE2 raportti № M2T9916-11)

28. Jalkanen J.-P. A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area / J.-P. Jalkanen, A. Brink, J. Kalli [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2009. — Vol. 9. — Is. 23. — Pp. 9209–9223.

29. Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide / J.-P. Jalkanen, L. Johansson, J. Kukkonen, A. Brink, J. Kalli, T. Stipa // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2012. — Vol. 12. — Is. 5. — Pp. 2641–2659. — DOI: 10.5194/acp-12-2641-2012.

30. Modelling of discharges from Baltic Sea shipping / J.-P. Jalkanen, L. Johansson, M. Wilewska-Bien [et al.] // Ocean Science. — 2021. — Vol. 17. — Is. 3. — Pp. 699–728. — DOI: 10.5194/os-17-699-2021.

31. Таровик О. В. Концепция и программная реализация цифрового двойника проекта судна на ранних стадиях проектирования / О. В. Таровик, А. В. Косоротов, М. О. Матаруев и др. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 137–155. — EDN VUUQ GK.

32. Tarovik O. A benchmark study on ship speed prediction models in Arctic conditions: machine learning, process-based and hybrid approaches / O. Tarovik, D. Eremenko, A. Topaj // Ocean Engineering. — 2024. — Vol. 311. — Pp. 118884. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.118884.

33. A Holistic Multi-Objective Design Optimization Approach for Arctic Offshore Supply Vessels / A. A. Kondratenko, M. Bergström, A. Reutskii, P. Kujala // Sustainability. — 2021. — Vol. 13. — Is. 10. — DOI: 10.3390/su13105550.

34. Косоротов А. В. Метод оценки буксировочного сопротивления современных ледоколов и судов ледового плавания на чистой воде / А. В. Косоротов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — № 1(391). — С. 29–41. — EDN SVLEJT. — DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-29-41.

35. Васеха М. В. Методология оценки выбросов парниковых газов судами при движении во льдах / М. В. Васеха, Ж. В. Васильева, А. И. Белухин [и др.] // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16. — № 1(61). — С. 151–162. — EDN DMQYGP. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-1-151-162.

36. Киджи Д. С. Методика районирования акватории Северного морского пути при проведении аварийноспасательных работ и ликвидации разливов нефти / Д. С. Киджи, Е. О. Ольховик // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1030–1040. — EDN BKPRKX. — DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1030-1040.
37. Обзор проблем развития Северного морского пути / А. С. Реуцкий, Е. В. Бабчук, Н. Ю. Родионов, А. О. Березин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56. — № 1. — С. 91–109. — EDN MFZHOD.
38. Liu S. Regression analysis of experimental data for added resistance in waves of arbitrary heading and development of a semi-empirical formula / S. Liu, A. Papanikolaou // Ocean Engineering. — 2020. — Vol. 206. — Pp. 107357. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107357.
39. Strat M. Le. Numerical modelling of the effects of trim on a ship's form factor and viscous resistance / M. Le. Strat, M. Terziev // 2024 International Conference on Postgraduate Research in Maritime Technology — 2024.
40. Kishev R. Global View on Ship Trim Optimization / R. Kishev [et al.] // Proceedings of the 2nd International Symposium on Naval Architecture and Maritime. Web. 26 Aug. 2026. — Istanbul, Turkey: Yildiz Technical University, 2019.
41. Performance of SOFC and PEMFC Auxiliary Power Systems Under Alternative Fuel Pathways for Bulk Carriers / M. Tadros, A. G. Elkafas, E. Boulougouris, I. Lazakis // Journal of Marine Science and Engineering. — 2026. — Vol. 14. — Is. 8. — DOI: 10.3390/jmse14080702.
42. Kim H. A real-time lifecycle analysis model with digital twin and novel control method for enhancing the environmental performance of electric/hybrid propulsion ships / H. Kim // Ocean Engineering. — 2025. — Vol. 329. — Pp. 121195. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.121195.

REFERENCES

1. Dmitrieva T. M. “Ob uchete Vspomogatel’nykh organami Ramochnoy konventsii OON ob izmenenii klimata (RKIK OON) emissii parnikovyykh gazov pri transportirovke bunkernogo topliva.” *Energeticheskaya politika* undefined (2006).
2. International Maritime Organization. *Study of Greenhouse Gas Emissions from Ships: Final Report to the International Maritime Organization*. Issue no. 2, IMO, 31 Mar. 2000.
3. Buhaug, Øyvind et al. *Second IMO GHG Study 2009*. International Maritime Organization, 2009.
4. Smith, Tristan W. P. et al. *Third IMO GHG Study 2014*. International Maritime Organization, 2014.
5. Faber, Jasper et al. *Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020*. International Maritime Organization, 2020.
6. Reutskiy, A. S. and E. O. Ol’khovik. “Using automatic identification system data to determine the carbon footprint of shipping.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 171–189. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-171-189.
7. Nunes, R. A. O., M. C. M. Alvim-Ferraz, F. G. Martins and S. I. V. Sousa. “The activity-based methodology to assess ship emissions - A review.” *Environmental Pollution* 231 (2017): 87–103. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.07.099.
8. Ivanchenko, A. A. “Forecasting and monitoring of water transport operational safety.” *Scientific and Analytical Journal “Vestnik Saint-Petersburg University of State Fire Service Of Emercom Of Russia”* 2 (2018): 57–60.
9. Lozhkin, V. N. and O. V. Lozhkina. “Forecasting of air pollution by vessel and motor transport engines” emissions.” *Transport Rossiyskoy Federatsii* 1(68) (2017): 59–62.
10. BenHakoun, E., E. V. D. Voorde and Y. Shiftan. “The daily port and shoreline emission inventory model.” *Maritime Policy & Management* 51.4 (2024): 588–616. DOI: 10.1080/03088839.2023.2243486.
11. Reutskiy, A. S., V. K. Shurpyak and S. A. Tolmachev. “Analysis of the IMO guidelines for estimating the intensity of greenhouse gas emissions over the life cycle for all types of marine fuels.” *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 79 (2025): 14–25.
12. Reutskiy, A. S. and E. O. Ol’khovik. RU 2 026 664 304. Avtomatizirovannaya sistema sbora dannykh dlya otsenki uglerodnogo sleda ot sudokhodstva. Russian Federation, assignee. Publ. May 14, 2026.
13. Berezin, A. O., A. S. Reutskiy, V. K. Shurpyak and S. A. Tolmachev. “Assessment of the consequences of the possible introduction of the IMO net-zero framework.” *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 56.2 (2026): 25–53.

14. Buyanov, A. S., V. V. Yakimov and A. S. Reutskiy. "Energy efficiency coefficient as a tool for determining the carbon footprint from the operation of sea-going ships of ice classes." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 72-73 (2023): 21–31.
15. Buyanov, A. S. and A. S. Reutskiy. "Formirovanie metodologicheskogo podkhoda k protsessu opredeleniya uglerodnogo sleda transportnoy uslugi s ispol'zovaniem koeffitsientov energoeffektivnosti sudna." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 70-71 (2023): 13–28.
16. Reutskiy, A. S., V. V. Yakimov and A. A. Butsanets. "Assessment of the impact of the type of marine fuel used on the carbon footprint of the transport service." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 76 (2024): 87–95.
17. Reutskiy, A. S., D. S. Semionichev and A. A. Mikheeva. "Identification of the main ways to implement climate projects in waterborne transport." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 75 (2024): 4–15.
18. Reutskiy, A. S. and A. A. Butsanets. "Updating the marine vessel market: implementing alternative fuels and energy-efficient technologies (eets)." *Sbornik nauchnykh statey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO "GUMRF imeni admirala S.O. Makarova" : Sbornik nauchnykh statey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 06–20 oktyabrya 2025 goda. Tom 2* Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2025: 109–121.
19. Reutskiy, A. S. and E. O. Ol'khovik. "Using automatic identification system data to determine the carbon footprint of shipping." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 171–189. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-171-189.
20. Topaj, A. and O. Tarovik. "Hybrid cell-wave algorithm for ship routing in ice under spatiotemporal constraints." *Ocean Engineering* 326 (2025): 120863. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.120863.
21. Eyring, V. et al. "Multi-model simulations of the impact of international shipping on Atmospheric Chemistry and Climate in 2000 and 2030." *Atmospheric Chemistry and Physics* 7.3 (2007): 757–780. DOI: 10.5194/acp-7-757-2007.
22. Lloyd's Register. *Marine Exhaust Emissions Quantification Study: Mediterranean Sea*. Report no. 99/EE/7044. London: Lloyd's Register, 1999.
23. Tsyro, S. and E. Berge. "Estimation of Acidifying Deposition in Europe Due to International Shipping Emissions in the North Sea and the North East Atlantic Ocean." *Environmental Coastal Regions*. Ed. C. A. Brebbia. Boston: WIT Press, 1998. 175–184.
24. Bartnicki, J., V. S. Semeena and H. Fagerli. "Atmospheric deposition of nitrogen to the Baltic Sea in the period 1995–2006." *Atmospheric Chemistry and Physics* 11.19 (2011): 10057–10069. DOI: 10.5194/acp-11-10057-2011.
25. Olivier, J. G. J., A. F. Bouwman, C. W. M. V. D. Maas and J. J. M. Berdowski. "Emission database for global atmospheric research (Edgar)." *Environmental Monitoring and Assessment* 31.1 (1994): 93–106. DOI: 10.1007/BF00547184.
26. Olivier, J. G. J. and J. J. M. Berdowski. "Global Emissions Sources and Sinks." *The Climate System*. Lisse: A.A. Balkema Publishers, 2001. 33–78.
27. Mäkelä, K., A. Tuominen, and E. Pääkkönen. *Suomen vesiliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä MEERI 2000*. VTT Tutkimusraportti № RTE 1370/01, MOBILE2 raportti № M2T9916-11. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 2001. 26 Aug. 2026
28. Jalkanen, J.-P. et al. "A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area." *Atmospheric Chemistry and Physics* 9.23 (2009): 9209–9223. DOI: 10.5194/acp-9-9209-2009.
29. Jalkanen, J.-P. et al. "Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide." *Atmospheric Chemistry and Physics* 12.5 (2012): 2641–2659. DOI: 10.5194/acp-12-2641-2012.
30. Jalkanen, J.-P. et al. "Modelling of discharges from Baltic Sea shipping." *Ocean Science* 17.3 (2021): 699–728. DOI: 10.5194/os-17-699-2021.
31. Tarovik, O. V., A. V. Kosorotov et al. "Concept and software implementation of a digital sibling of a ship at early design stages." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 80 (2025): 137–155.
32. Tarovik, O., D. Eremenko and A. Topaj. "A benchmark study on ship speed prediction models in Arctic conditions: machine learning, process-based and hybrid approaches." *Ocean Engineering* 311 (2024): 118884. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.118884.

33. Kondratenko, A. A., M. Bergström, A. Reutskii and P. Kujala. "A Holistic Multi-Objective Design Optimization Approach for Arctic Offshore Supply Vessels." *Sustainability* 13.10 (2021). DOI: 10.3390/sul13105550.
34. Kosorotov, A. V. "Towing resistance assessment method for modern icebreakers and ice-going vessels in open water." *Transactions of The Krylov State Research Centre* 1(391) (2020): 29–41. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-29-41.
35. Vasekha, M. V., Zh. V. Vasil'eva et al. "Methodology for estimating greenhouse gas emissions from ships moving in ice." *Arctic: Ecology and Economy* 16.1(61) (2026): 151–162. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-1-151-162.
36. Kidzhi, D. S. and E. O. Ol'khovik. "Methodology for zoning the northern sea route water area during salvage and rescue operations and oil spill response." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 15.6 (2023): 1030–1040. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1030-1040.
37. Reutskiy, A. S., E. V. Babchuk, N. Yu. Rodionov and A. O. Berezin. "Problems of the development of the northern sea route: an overview." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 56.1 (2026): 91–109.
38. Liu, S. and A. Papanikolaou. "Regression analysis of experimental data for added resistance in waves of arbitrary heading and development of a semi-empirical formula." *Ocean Engineering* 206 (2020): 107357. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107357.
39. Strat, M. Le and M. Terziev. "Numerical modelling of the effects of trim on a ship's form factor and viscous resistance." *2024 International Conference on Postgraduate Research in Maritime Technology*. 2024.
40. Kishev, Rumen, et al. "Global View on Ship Trim Optimization." *Proceedings of the 2nd International Symposium on Naval Architecture and Maritime*. Istanbul, Turkey: Yildiz Technical University, 2019. Web. 26 Aug. 2026.
41. Tadros, M., A. G. Elkafas, E. Boulougouris and I. Lazakis. "Performance of SOFC and PEMFC Auxiliary Power Systems Under Alternative Fuel Pathways for Bulk Carriers." *Journal of Marine Science and Engineering* 14.8 (2026). DOI: 10.3390/jmse14080702.
42. Kim, H. "A real-time lifecycle analysis model with digital twin and novel control method for enhancing the environmental performance of electric/hybrid propulsion ships." *Ocean Engineering* 329 (2025): 121195. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.121195.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Реуцкий Александр Сергеевич —
кандидат технических наук
Российский морской регистр судоходства
191181, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А
e-mail: reutskii.as@rs-class.org

Ольховик Евгений Олегович —
доктор технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
email: olhovikeo@gumrf.ru

Дмитриева Татьяна Михайловна —
кандидат географических наук
ФКУ «Гидрометсервис»
123995, Российская Федерация, Москва,
Нововаганьковский переулок, д. 8
email: dmtanya@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Reutskii, Aleksandr S. —
candidate of Technical Sciences
Russian Maritime Register of Shipping
7A, Millionnaya str., St. Petersburg,
191186, Russian Federation
e-mail: reutskii.as@rs-class.org.

Ol'khovik, Evgeniy O. —
Doctor of Technical Sciences
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

Dmitrieva, Tatiana M. —
Candidate of Geographical Sciences
FKU «Gidrometservis»
8, Novovagankovsky Lane, Moscow,
123995, Russian Federation
email: dmtanya@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13 июля 2026 г.
Received: July. 13, 2026.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-713-729

EDN NFXDWH

УДК 629.5

ОБУЧЕНИЕ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В УПРАВЛЕНИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛОГИСТИКОЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

М. Н. Григорьев¹, Е. А. Королёва², С. А. Уваров³

¹ ФГБУ ВО «Балтийский государственный технический университет «Военмех» имени Д. Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация,

² ФГБУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ ФГБУ ВО «Санкт-Петербургский государственный экономический университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье выполнен системный анализ современного состояния исследований, посвященных применению методов обучения с подкреплением для оптимизации производственной логистики и управления цепями поставок в судостроительной отрасли. Подробно охарактеризована специфика судостроения как производства типа «разработка под заказ», при котором каждое изделие проектируется и изготавливается «с нуля» в соответствии с уникальными требованиями заказчика, что отличает его от серийного производства. Показано, что данная особенность предъявляет повышенные требования к адаптивности систем планирования, которые должны функционировать в условиях неопределенности и частых изменений. Проведен сравнительный анализ трех основных классов методов оптимизации: классических эвристических правил диспетчеризации, метаэвристических подходов, включая генетические алгоритмы и алгоритмы роевого интеллекта, а также алгоритмов глубокого обучения с подкреплением различных типов. Выполнено сравнение по важным критериям качества решений, вычислительной эффективности, устойчивости к возмущениям и способности к дообучению в реальном времени. Отмечается, что обучение с подкреплением обеспечивает более высокую адаптивность и оперативность принятия решений по сравнению с традиционными методами, особенно в динамически изменяющейся производственной среде. Отдельное внимание уделено цифровым двойникам как обязательной среде для безопасного обучения агентов в соответствии с требованиями международного стандарта; показано, что только такая среда позволяет проводить многократные эксперименты без остановки реального производства. Систематизированы примеры внедрения элементов обучения с подкреплением на судостроительных верфях и в смежных отраслях, включая пилотные проекты в Южной Корее, Испании и Норвегии. На основе выявленных пробелов сформулированы перспективные направления исследований: разработка мультиагентных систем для координации множества решений, применение трансферного обучения для ускоренной адаптации к новым типам заказов и интеграция с генеративным искусственным интеллектом для синтеза альтернативных сценариев планирования.

Ключевые слова: судостроение, производственная логистика, обучение с подкреплением, цифровой двойник, сравнительный анализ, генетический алгоритм, эвристическое правило, глубокое обучение, управление цепями поставок, оптимизация расписания, имитационное моделирование, метаэвристика.

Для цитирования:

Григорьев, М. Н. Обучение с подкреплением в управлении производственной логистикой судостроительных предприятий: сравнительный анализ результатов и перспективы развития / М. Н. Григорьев, Е. А. Королёва, С. А. Уваров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 4. С. 713–729. EDN NFXDWH. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-713-729.

REINFORCEMENT LEARNING IN PRODUCTION LOGISTICS MANAGEMENT AT SHIPBUILDING ENTERPRISES: COMPARATIVE ANALYSIS OF RESULTS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

M. N. Grigoriev¹, E. A. Koroleva², S. A. Uvarov³

¹ Baltic State Technical University “Voenmekh” named after D. F. Ustinov. 190005, St. Petersburg, Russian Federation

² Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035, St. Petersburg, Russian Federation

³ St. Petersburg State University of Economics. 191023, St. Petersburg, Russian Federation

The paper presents a systematic analysis of the current state of research on the application of reinforcement learning methods to optimize production logistics and supply chain management in the shipbuilding industry. The specific features of shipbuilding as engineer-to-order production are described in detail; in this type of production, each product is designed and manufactured from scratch in accordance with unique customer requirements, which distinguishes it from serial production. It is shown that this feature places increased demands on the adaptability of planning systems, which must operate under conditions of uncertainty and frequent changes. A comparative analysis is conducted of three main classes of optimization methods: classical heuristic dispatching rules, metaheuristic approaches, including genetic algorithms and swarm intelligence algorithms, and various types of deep reinforcement learning algorithms. The methods are compared according to important criteria of solution quality, computational efficiency, robustness to disturbances, and the ability to continue learning in real time. It is noted that reinforcement learning provides greater adaptability and faster decision making than traditional methods, especially in a dynamically changing production environment. Special attention is paid to digital twins as an essential environment for the safe training of agents in accordance with the requirements of the international standard; it is shown that only such an environment makes it possible to conduct repeated experiments without interrupting actual production. Examples of the implementation of reinforcement learning elements at shipyards and in related industries, including pilot projects in South Korea, Spain, and Norway, are systematized. Based on the identified gaps, promising research directions are formulated: the development of multi-agent systems for coordinating multiple decisions, the use of transfer learning for accelerated adaptation to new order types, and integration with generative artificial intelligence for synthesizing alternative planning scenarios.

Keywords: shipbuilding, production logistics, reinforcement learning, digital twin, comparative analysis, genetic algorithm, heuristic rule, deep learning, supply chain management, scheduling optimization, simulation modeling, metaheuristic.

For citation:

Grigoriev, Mikhail N., E. A. Koroleva and S. A. Uvarov. “Reinforcement learning in production logistics management at shipbuilding enterprises: comparative analysis of results and development prospects.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 18.4 (2026): 713–729. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-713-729.

Введение (Introduction)

В настоящее время судостроительная отрасль переживает период глубокой цифровой трансформации, императив которой обусловлен одновременно растущей сложностью заказов, сжатыми сроками исполнения и необходимостью соответствовать все более жестким экологическим и экономическим нормативам. В этих условиях традиционные, основанные на фиксированных правилах и человеческом опыте методы управления производственной логистикой и цепями поставок верфи, в значительной мере исчерпывают свой потенциал. Как отмечается в масштабном аналитическом обзоре 2026 г. [1], судостроение заметно отстает от авиационной и автомобильной промышленности по уровню автоматизации процессов производственного планирования, а методологическая фрагментация препятствует созданию эффективных интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Одним из наиболее перспективных направлений, способных устранить этот разрыв, является использование методов машинного обучения и, в частности, обучения с подкреплением.

Обучение с подкреплением (RL) — раздел искусственного интеллекта (ИИ), в котором агент учится принимать решения, взаимодействуя со средой и получая числовые вознаграждения. За последние 5 лет это направление привлекло значительное внимание исследователей промышленной логистики. Способность RL-агента самостоятельно открывать эффективные стратегии диспетчеризации и оперативно адаптироваться к изменениям делает его теоретически идеальным кандидатом на роль ядра интеллектуальной системы управления цепями поставок в условиях Engineer-to-Order производства, каким и является судостроение.

ЕТО — это производственный подход, при котором продукт разрабатывается, проектируется и изготавливается с нуля для конкретного заказчика на основе его уникальных требований и спецификаций. В отличие от стандартных или массовых производств, ЕТО-производство фокусируется на персонализированных решениях, где каждый продукт уникален и создан с учетом индивидуальных потребностей заказчика. Однако переход от лабораторных экспериментов к реальному внедрению на верфях сдерживается рядом фундаментальных и прикладных проблем: отсутствием открытых промышленных датасетов, высокой стоимостью обучения, трудностью обеспечения надежности и интерпретируемости решений ИИ, а также неопределенностью в отношении наилучших архитектурных решений для интеграции RL с существующими системами планирования и цифровыми двойниками.

На сегодняшний день, несмотря на появление отдельных сообщений о пилотных проектах, в том числе анонсированных в 2026 г. интеграциях генеративного ИИ в логистические процессы верфей, таких как партнерство Cohere и Hanwha Ocean¹, целостная картина достижений, ограничений и перспектив RL-ориентированной логистики в судостроении в научной литературе отсутствует. Имеющиеся обзоры либо сфокусированы на общих вопросах цифровизации судостроения, либо рассматривают RL в отрыве от отраслевой специфики.

Настоящая работа призвана восполнить этот пробел. Ее цель — на основе систематического анализа русско- и англоязычных источников 2018–2026 гг. дать целостное представление о современном состоянии и мировых тенденциях в области применения *обучения с подкреплением* к задачам управления производственной логистикой судостроительных предприятий, выполнить критическое сопоставление RL с традиционными и метаэвристическими методами, а также определить ключевые барьеры и перспективные направления дальнейших исследований.

Для достижения этой цели в статье необходимо решить следующие задачи:

1. Формально описать специфику судостроительной логистики как объекта управления и сформулировать вытекающие из нее требования к адаптивным системам планирования.
2. Провести систематический обзор и классификацию существующих источников, посвященных применению RL в производственной логистике и управлении цепями поставок.
3. Выполнить сравнительный анализ эвристических, метаэвристических и RL-методов по комплексу критериев, критически важных для судостроения: качество решений (makespan, загрузка), устойчивость к возмущениям, вычислительная эффективность и способность к дообучению в реальном времени.
4. Проанализировать роль и современное состояние разработки цифровых двойников как необходимой среды для обучения и безопасного развертывания RL-агентов в судостроительном контексте.
5. На основе выявленных пробелов сформулировать приоритетные направления будущих исследований, способствующие переходу от экспериментальных прототипов к промышленному внедрению.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые в отечественной практике выполнен структурированный обзор, соединяющий три активно развивающиеся области: судостроительную логистику, глубокое обучение с подкреплением и технологию цифровых двойников, и дающий их критическое сопоставление на основе новейших публикаций 2025–2026 гг.

¹ Designing the Future Fleet: Cohere and Hanwha Ocean Bring Generative AI Into Shipbuilding's Core // Vanguard Canada. 2026. 3 April. URL: <https://vanguardcanada.com/designing-the-future-fleet-cohere-and-hanwha-ocean-bring-generative-ai-into-shipbuildings-core/> (дата обращения: 20.05.2026).

Практическая значимость исследования состоит в формировании доказательной базы для принятия решений о целесообразности и этапности внедрения RL-технологий на российских верфях, а также систематизации критериев выбора алгоритмического ядра будущих систем поддержки принятия решений.

База исследования (Research base)

Характеристика Engineer-to-Order производства и структуры материальных потоков. Судостроение является каноническим представителем производств типа Engineer-to-Order (ЕТО) — класса, в котором продукт разрабатывается и изготавливается по уникальным спецификациям заказчика, а значительная часть конструкторско-технологической проработки выполняется после получения заказа [2]. В отличие от Make-to-Stock или Assemble-to-Order, где номенклатура, маршруты обработки и нормы времени определены заранее, в ЕТО-среде каждое судно представляет собой, по существу, отдельный инвестиционный проект, что порождает высокую степень неопределенности на всех этапах производственного цикла [3].

Данная специфика глубоко изучена в ряде фундаментальных работ. В работе [2] на основе кейс-стади норвежской верфи выделены четыре ключевые проблемы производственной логистики в сложном ЕТО: 1) фрагментированные и несинхронизированные информационные потоки между проектными, закупочными и производственными подразделениями; 2) слабая идентифицируемость и прослеживаемость материальных единиц на всем пути от поставщика до монтажа на стапеле; 3) высокая зависимость операторов от неформализованных знаний и опыта в условиях отсутствия цифровых систем поддержки принятия решений; 4) неавтоматизированное перемещение крупногабаритных секций и блок-модулей, характеризующееся значительными простоями кранового оборудования. Авторы отмечают, что сложность координации материальных потоков в ЕТО экспоненциально возрастает по мере увеличения размерности изделия и числа субподрядчиков, вовлеченных в проект.

Эти выводы подтверждены в систематическом обзоре Fatouh и Rego [4], охватившем литературу по управлению цепями поставок в судостроении за последнее десятилетие. Судостроение характеризуется как «репрезентативная отрасль ЕТО», в которой получение заказа запускает одновременно процессы проектирования, закупок и ранних этапов производства, а календарно-сетевое планирование принципиально отличается от серийных производств высокой долей параллельно-последовательных операций с жесткими технологическими зависимостями [4]. В работе также показано, что, несмотря на значительное внимание исследователей к ЕТО в строительстве и общем машиностроении, судостроительная специфика в течение длительного времени оставалась недостаточно освещенной; лишь в последние годы наметился рост публикаций, посвященных отраслевым моделям планирования [4].

Особую сложность представляет многозвенная структура материальных потоков верфи. Она включает снабжение листовым и профильным металлопрокатом, комплектующими судовых систем, трубопроводной арматурой и оборудованием машинного отделения; внутризаводскую логистику между участками предварительной обработки, сборки и сварки секций, насыщения и окраски, а также межцеховую координацию, в рамках которой крупногабаритные блоки и секции должны быть доставлены в зону стапеля в строго определенной технологической последовательности. Нарушение этой последовательности даже на одном звене может вызвать каскад задержек по всей цепочке, что непосредственно отражается на общем сроке выполнения заказа — ключевом обязательстве верфи перед заказчиком.

Авторы работы [3] исследовали природу неопределенности, присущую ЕТО-среде в судостроении, и предложили различать два подтипа такого производства: Innovate-to-Order (ИТО) — создание полностью нового продукта с высокой долей научно-исследовательской проработки — и Redesign-to-Order (РТО) — адаптация существующего базового проекта под специфические требования заказчика [3]. Авторы показали, что источники неопределенности варьируются в зависимости от подтипа: для ИТО доминируют неопределенности проектного этапа (возможность технических ошибок, незрелость конструкторской документации на момент запуска закупок), тогда

как для RTO первостепенны колебания со стороны поставок и доступности критических ресурсов [3]. Это разграничение имеет прямое следствие для проектирования систем производственного планирования: алгоритмическое ядро должно быть способно адаптироваться к различным профилям неопределенности без перенастройки «вручную».

Ключевые показатели эффективности и типовые узкие места. Практика судостроительного планирования оперирует несколькими ключевыми показателями эффективности, среди которых центральное место занимает *makespan* — общее календарное время выполнения производственной программы от запуска первой операции до сдачи последней секции на стапель. В классической постановке задачи календарного планирования верфи, формализованной в работе [5], целевая функция минимизации *makespan* дополняется штрафами за нарушение директивных сроков (*tardiness*) и ограничениями на емкость межоперационных буферов, обусловленными физическими размерами собираемых блок-секций. Авторы подчеркивают, что учет ограниченной вместимости буферов является уникальной особенностью судостроительной задачи, редко встречающейся в литературе по Job Shop Scheduling общего профиля [5].

Вторым критическим показателем является *загрузка оборудования*, в первую очередь — дорогостоящего кранового парка верфи. Краны обслуживают одновременно несколько строящихся заказов, и их расписание является одним из главных «узких мест», лимитирующих пропускную способность всей производственной системы. В исследовании [6] предложена модель многокритериальной оптимизации, в которой наряду с *makespan* и стоимостью минимизируются также время простоя оборудования и общее энергопотребление, что отражает современный тренд на устойчивое развитие производственных систем.

Третьим интегральным показателем выступает *ритмичность* — равномерность загрузки производственных мощностей на всем горизонте планирования. В судостроении колебания загрузки особенно выражены: пиковые периоды (одновременное формирование корпуса на стапеле и насыщение секций) сменяются спадами, что ведет к неэффективному использованию рабочей силы. Сглаживание профиля загрузки является самостоятельной оптимизационной задачей, тесно связанной с управлением цепями поставок: несвоевременная доставка критических комплектующих способна как вызвать простой, так и, напротив, спровоцировать авральный режим работы с переработками и повышенным риском дефектов.

К типовым узким местам судостроительной логистики, многократно идентифицированным в литературе [2–4], относятся: разрыв между темпом подачи металлопроката и производительностью сборочных участков; конфликт за крановое время между параллельными проектами; запаздывание поставок оборудования с длительным циклом изготовления; непредвиденные доработки по результатам контроля сварных швов, нарушающие исходное расписание.

Ограничения традиционных систем планирования в условиях неопределенности. Классические инструменты производственного планирования — от алгоритмов MRP II (Manufacturing Resource Planning) до систем класса APS (Advanced Planning & Scheduling) и моделей дискретно-событийного имитационного моделирования (DES) — разрабатывались преимущественно для условий серийного и крупносерийного производств [3]. Их применение в судостроительной ЕТО-среде имеет ряд фундаментальных ограничений.

Во-первых, методология MRP II предполагает наличие абсолютно точных спецификаций изделия (BOM) и технологических маршрутов на момент планирования [3]. В судостроении это требование заведомо невыполнимо: конструкторская документация «вызревает» параллельно с выполнением заказа, и значительная часть позиций специфицируется лишь после подписания контрактов с поставщиками оборудования, что приводит к постоянным корректировкам ведомостей материалов. Стандартный механизм MRP-перепланирования, предполагающий полный пересчет потребностей при каждом изменении, оказывается слишком инерционным и вычислительно затратным для масштаба верфи [3].

Во-вторых, системы класса APS, хотя и превосходят MRP II по качеству формируемых расписаний за счет одновременного учета материальных и мощностных ограничений, ориентированы

на построение детерминированного плана для заранее известного множества заказов. Стохастическая природа судостроительных процессов — вариабельность длительности сварочных операций, случайные отказы оборудования, непредсказуемые задержки поставок — требует либо закладывания чрезмерных временных резервов, снижающих пропускную способность, либо постоянных ручных корректировок плана диспетчерским персоналом. Как отмечается в работе [5], традиционные подходы к планированию блок-секций, опирающиеся на предположение о неограниченной вместимости буферов, дают решения, нереализуемые в реальных цеховых условиях.

В-третьих, метод DES, получивший широкое распространение на верфях как инструмент валидации производственных расписаний, обладает принципиальным ограничением: имитационная модель способна оценить последствия заданного плана, но не генерирует сам план и не адаптирует его к изменяющейся обстановке. DES-модели лишены способности к обучению на исторических данных и требуют повторного прогона при каждом значимом отклонении, что не позволяет использовать их в качестве ядра системы оперативного планирования в реальном масштабе времени.

Таким образом, совокупность указанных ограничений формирует объективный запрос на переход к адаптивным, самообучающимся методам планирования, способным функционировать в условиях высокой неопределенности и неполноты исходных данных — запрос, на который отвечают методы обучения с подкреплением, рассмотренные далее.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Анализ методов оптимизации производственной логистики. Оптимизация производственной логистики в судостроении, как и в других отраслях дискретного машиностроения, прошла путь от простейших эвристических правил до интеллектуальных систем, основанных на глубоком обучении с подкреплением. Здесь представлен систематический обзор трех классов методов: эвристических, метаэвристических и методов на основе RL, с акцентом на их применимость к условиям судостроительного ЕТО-производства, характеризуемого высокой неопределенностью, уникальностью заказов и жесткими технологическими ограничениями.

Классические эвристики и правила диспетчеризации. Эвристические методы на протяжении десятилетий оставались основным инструментом оперативного управления производственной логистикой благодаря своей вычислительной простоте и интуитивной понятности для диспетчерского персонала (например, комплексный обзор методов оптимизации судостроительного производства [1] относит классические эвристики к базовому уровню инструментов). Наиболее распространенные правила диспетчеризации включают:

- FIFO (First-In-First-Out) — заказы обслуживаются в порядке поступления в систему; правило обеспечивает справедливое распределение времени ожидания, но не чувствительно к длительности операций и срочности заказов;
- SPT (Shortest Processing Time) — приоритет отдается заказу с наименьшей длительностью обработки на данной операции; это правило минимизирует среднее время пребывания заказа в системе, однако создает риск «голодания» длительных операций;
- LIFO (Last-In-First-Out) — приоритет у заказа, поступившего последним; применяется редко в рутинном планировании, но может использоваться при авральных ситуациях;
- MST (Minimum Slack Time) — приоритет у заказа с минимальным резервным временем до директивного срока.

Ключевое преимущество эвристических правил — нулевое время принятия решения и отсутствие необходимости в вычислительной инфраструктуре. Однако их фундаментальный недостаток заключается в статичности: каждое правило оптимизирует лишь один частный критерий и не способно адаптироваться к изменяющейся производственной ситуации [7]. Именно это обстоятельство обусловило переход к более сложным методам.

Метаэвристические подходы. Метаэвристические алгоритмы представляют собой класс методов, предназначенных для поиска решений, близких к оптимальным, в задачах высокой размерности, где полный перебор вычислительно неосуществим. В судостроительном производ-

ственном планировании наибольшее распространение получили генетические алгоритмы (ГА), алгоритмы роя частиц (PSO), имитация отжига и табу-поиск [8].

Генетический алгоритм имитирует процесс естественной эволюции: популяция возможных расписаний подвергается операциям селекции, скрещивания и мутации, постепенно улучшая значение целевой функции. В работе [8] ГА применен к классической для судостроения трехстадийной задаче Джонсона при изготовлении секции корпуса судна; компьютерный эксперимент показал, что ГА находит решение, близкое к оптимальному, за приемлемое время. Более сложная постановка рассмотрена в [9], где предложен самообучающийся гиперэвристический алгоритм на основе ГА (GA-SLHN) для задачи логистического планирования сборки модульных каютных блоков круизных судов. Отличительной чертой GA-SLHN является использование самообучающейся стратегии высокого уровня, которая динамически выбирает низкоуровневые эвристики из заранее сформированного пула; результаты промышленного внедрения показали сокращение транспортного времени до 37 % [9].

Работа [10] посвящена применению ГА для решения задачи календарного планирования с ограниченными ресурсами (RCPSP) в судостроении в условиях неопределенности. Предложенная схема сочетает ГА с методами вероятностного моделирования и сценарного анализа, позволяя одновременно минимизировать срок завершения проекта и максимизировать загрузку ресурсов. Анализ Парето-оптимальных решений дает лицу, принимающему решения, инструмент для оценки компромиссов между временем, стоимостью и распределением ресурсов [10].

Общим достоинством метаэвристик является их способность решать задачи, не поддающиеся точным методам оптимизации. Однако они обладают и рядом принципиальных ограничений. Во-первых, метаэвристики требуют полного перезапуска при изменении параметров задачи, что исключает их применение в режиме реального времени. Во-вторых, качество решения критически зависит от настройки многочисленных параметров, а сама настройка представляет собой отдельную оптимизационную задачу. В-третьих, метаэвристики не используют накопленный исторический опыт: каждое новое расписание строится «с нуля» [1].

Глубокое обучение с подкреплением: базовые модели и формализация задачи логистики. Обучение с подкреплением (Reinforcement Learning, RL) представляет собой принципиально иной подход, свободный от многих ограничений классических и метаэвристических методов. В отличие от статических оптимизаторов, RL-агент обучается в процессе взаимодействия со средой, получая числовое вознаграждение за каждое действие, постепенно вырабатывает стратегию, максимизирующую кумулятивное вознаграждение [11].

Формализация задачи производственной логистики как марковского процесса принятия решений (Markov Decision Process, MDP) включает три ключевых компонента:

Состояние (State): вектор признаков, описывающих текущее состояние производственной системы — статус каждого заказа, занятость и исправность оборудования, уровень заполнения межоперационных буферов, оставшееся время до директивных сроков. В судостроительном контексте размерность пространства состояний чрезвычайно высока и требует применения глубоких нейронных сетей для аппроксимации функции ценности или стратегии.

Действие (Action): решение, принимаемое агентом в данном состоянии, — выбор следующего заказа из очереди, назначение операции на конкретную единицу оборудования, изменение приоритета. Пространство действий может быть как дискретным, так и непрерывным.

Вознаграждение (Reward) — скалярная величина, получаемая агентом после выполнения действия. В задачах минимизации makespan вознаграждение обычно определяется как отрицательное приращение времени выполнения заказа, что стимулирует агента завершать программу как можно быстрее [12].

Среди алгоритмов глубокого RL, нашедших применение в производственной логистике, выделяются три основных семейства:

DQN (Deep Q-Network). Алгоритм аппроксимирует функцию ценности действия $Q(s,a)$ с помощью глубокой нейронной сети, обучаемой методом минимизации временной разницы. DQN

хорошо работает с дискретными пространствами действий умеренной размерности, однако страдает от переоценки ценности и нестабильности обучения [12].

A2C (Advantage Actor-Critic) и A3C (Asynchronous A3C). Актор-критические архитектуры сочетают две сети: актор, параметризующий стратегию $\pi(a|s)$, и критик, оценивающий ценность состояния $V(s)$. Преимущество перед DQN — возможность работы с непрерывными пространствами действий и более высокая стабильность обучения за счет использования функции преимущества, снижающей дисперсию градиента [7].

PPO (Proximal Policy Optimization). На сегодняшний день PPO является доминирующим алгоритмом в задачах производственного планирования благодаря своей стабильности и эффективности выборки [13]. Ключевой идеей PPO является ограничение величины изменения стратегии на каждой итерации с помощью специальной клиппированной целевой функции, что предотвращает разрушительно большие обновления параметров. Сравнительные исследования убедительно демонстрируют, что PPO-агент быстрее и стабильнее сходится к оптимальному решению по сравнению с семейством DQN [14].

Систематический обзор (2025) [13] 26 исследований подтверждает, что передовые методы RL, особенно DQN и PPO, все чаще превосходят метаэвристики и классические эвристики при решении задач гибридного потокового планирования, при этом намечается устойчивый тренд на гибридизацию RL с другими оптимизационными техниками [13].

Анализ успешных внедрений RL в дискретном производстве и логистике. Имеющийся к 2026 г. массив публикаций содержит ряд значимых примеров, демонстрирующих эффективность RL в задачах, релевантных судостроению.

Динамическое планирование распределенных производственных систем. В работе [12] пять алгоритмов глубокого RL (DQN, Double DQN, Dueling DQN, TRPO, PPO) применены к задаче динамического распределенного планирования с транспортными ограничениями (DDJSPT). Показано, что PPO превосходит остальные алгоритмы по критерию среднего запаздывания, а предложенная архитектура обеспечивает обобщение на 243 производственные конфигурации [12].

Совместное планирование производства и логистики. В работе 2025 г. [15] предложили вложенно-иерархическую архитектуру глубокого RL для совместного планирования производства и логистики в динамических гибких цехах, где агенты верхнего и нижнего уровней координируют распределение работ и транспортных ресурсов соответственно.

Сравнение RL с правилами диспетчеризации. В работе Zhou и Rose (2025) авторы провели сравнительное имитационное исследование, в котором DRL-агент на основе актор-критической архитектуры динамически назначал веса отдельным правилам диспетчеризации, формируя контекстно-зависимую гибридную стратегию. Результаты моделирования на реалистичной модели сложного цеха показали, что предложенный подход устойчиво превосходит как отдельные правила, так и гибридные стратегии со статическими весами по критериям длительности цикла, своевременности поставок и пропускной способности [7].

Обзор шаблонов проектирования DRL для производственного планирования. Авторы [11] (2025) идентифицировали типовые паттерны проектирования DRL-моделей для задач календарного планирования, охватывающие архитектуру агента, среду, представление состояния и действий, а также функцию вознаграждения. Авторы обобщили процедуры обучения и применения DRL-решателей, выделив ключевые показатели для их сравнительной оценки.

Применение RL в судостроении. Знаковым примером является работа [16], в которой RL-агент на основе CNN-автоэнкодера обучен в среде цифрового двойника (Unity 3D) решать задачу размещения блок-секций в предстепельной зоне верфи. RL-агент превзошел экспертов-людей по качеству плана размещения примерно на 15 % [16], что является одним из первых подтверждений практической эффективности RL в судостроительном контексте.

Таким образом, проведенное исследование демонстрирует, что эвристические и метаэвристические методы, сохраняя значимость для долгосрочного планирования, уступают RL-подходам в способности к адаптации и обучению в реальном времени, что делает RL наиболее пер-

спективным ядром для интеллектуальных систем оперативного управления производственной логистикой. Вместе с тем эффективное применение RL в судостроении требует адекватной среды обучения, роль которой выполняют цифровые двойники, рассматриваемые в следующем разделе.

Результаты (Results)

Цифровые двойники как среда для обучения и развертывания RL-решений

Концепция цифрового двойника и стандарт ISO 23247. Цифровой двойник (Digital Twin, DT) определяется как виртуальное представление физического объекта или системы, синхронизированное с ним на протяжении всего жизненного цикла и обеспечивающее двусторонний обмен данными между реальным и виртуальным мирами. В производственном контексте DT выступает одновременно как инструмент мониторинга текущего состояния, среда для безопасного экспериментирования с альтернативными сценариями и платформа для обучения интеллектуальных агентов без риска нарушения реальных производственных процессов.

Ключевым нормативным фундаментом для разработки и внедрения DT в промышленности является серия международных стандартов ISO 23247 Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing, первая редакция которой опубликована в 2021 г. Стандарт ISO 23247-1:2021 определяет общие принципы и терминологию². В 2025–2026 гг. серия дополнена техническими отчетами, описывающими конкретные сценарии использования, включая управление сложными технологическими процессами в других высокотехнологичных отраслях³.

Применительно к судостроению стандарт ISO 23247 получил развитие в работе Sánchez-Fernández et al. (2026) [17], в которой предложен фреймворк для создания процессных цифровых двойников, структурированный вокруг трех уровней цифровой зрелости:

- базовый мониторинг — односторонний поток данных с физического объекта в виртуальную модель;
- расширенная аналитика — интеграция разнородных источников, накопление исторических данных и применение алгоритмов диагностики;
- предиктивное управление — полноценная двусторонняя связь, позволяющая виртуальной модели воздействовать на физический процесс в реальном масштабе времени [17, с. 3–5].

Этот фреймворк верифицирован на реальной пилотной ячейке в Центре инноваций и робототехники верфи NAVANTIA в Ферроле (Ла-Корунья, Испания), где DT используется для координации роботизированной сварки, компьютерного зрения и автономных транспортных средств при изготовлении компонентов малой предварительной сборки [17].

Двусторонняя связь является принципиальным условием превращения DT из пассивной имитационной модели в активную среду обучения. Как показано в исследовании интернета вещей (IoT) для интеллектуального производства в судостроительных цехах (2025), двунаправленная DT-система, развернутая на участке резки стали, обеспечивает сбор, передачу, хранение и симуляционный анализ данных в реальном времени, создавая основу для внедрения алгоритмов интеллектуального планирования на базе RL [18]. Среди выявленных барьеров — унификация технических стандартов, безопасность коммуникаций, гарантии реального времени и механизмы межцехового взаимодействия [18].

Анализ архитектур «симуляция-оптимизация» и способов интеграции RL-агента с DT

В литературе по судостроительному производственному планированию сформировалось два методологически различных подхода к интеграции RL и DT: гибридные архитектуры «симуляция-оптимизация» и архитектуры прямого встраивания RL-агента в DT-среду.

Гибридные архитектуры «симуляция-оптимизация». Данный класс решений предполагает использование дискретно-событийной имитационной модели (DES) в качестве ядра DT, поверх которого надстраивается оптимизационный слой. В обзоре [1] показано, что гибридные

² ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles. Geneva : ISO, 2021. 12 p.

³ ISO/TR 23247-100:2025. Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 100: Use case on management of semiconductor ingot growth process. Geneva : ISO, 2025. 18 p.

DES-оптимизационные фреймворки в настоящее время представляют собой наиболее операционально зрелый класс методов: они опираются на десятилетия отраслевого опыта применения DES на верфях и обеспечивают измеримые улучшения производственных показателей в структурированных условиях. Однако авторы подчеркивают, что многие DT- и AI- ориентированные работы приоритизируют архитектурную интеграцию и синхронизацию данных в ущерб лонгитюдной валидации по общеверфным KPI [1].

Примером зрелой гибридной архитектуры применительно к судостроению является система динамической диспетчеризации транспортировки блок-секций на основе DT, предложенная в работе [19]. В этой архитектуре DT-модель верфи обеспечивает отображение реальной дорожной ситуации и местоположения блоков в реальном времени, а оптимизационный слой на основе генетического алгоритма (GA) формирует расписание для парка транспортеров с учетом негабаритности секций и ограничений грузоподъемности. Экспериментальные сравнения на различных сценариях подтвердили, что DT-ориентированный подход устойчиво превосходит традиционные методы диспетчеризации по критериям времени транспортировки и ритмичности сборочных операций [19].

Прямое встраивание RL-агента в DT-среду. Альтернативный подход предполагает, что DT не просто предоставляет данные оптимизатору, а сам становится средой обучения для RL-агента. Наиболее показательным примером в судостроительном контексте является работа [16], в которой RL-агент обучается в среде цифрового двойника, построенного на игровом движке Unity 3D, для решения задачи размещения блок-секций в предстпельной зоне верфи. Пространство состояний формируется путем сверточной дискретизации плана зоны, что позволяет агенту на основе CNN-автоэнкодера компактно кодировать топологию доступного пространства; вознаграждение определяется как минимизация расстояния перемещения крана «Голиаф». Результаты показали, что RL-агент превосходит экспертов-людей по качеству плана размещения примерно на 15 %, а время формирования плана сокращается с нескольких недель до часов [16].

На общеархитектурном уровне вопрос интеграции RL и DT активно исследуется и за пределами судостроения. В систематическом обзоре применения DT в автомобильной и авиационной промышленности с переносом знаний на морскую отрасль (2025) [20] отмечается, что в автомобилестроении DT используются для повышения эффективности и безопасности автономных транспортных средств, а в авиации — для предиктивного обслуживания, обучения пилотов и мониторинга в реальном времени; морская отрасль, сталкиваясь с проблемами качества данных и эксплуатационной сложности, обладает значительным потенциалом для применения DT в задачах повышения производительности судов, безопасности и предиктивного обслуживания [20]. Предложенная авторами «дорожная карта» переноса знаний включает адаптацию DT-архитектур для морской специфики, в том числе для задач производственного планирования верфей.

Стратегическое значение интеграции RL и DT подтверждается и на уровне промышленных альянсов. В феврале 2026 г. HD Hyundai и Siemens анонсировали проект по созданию единой цифровой платформы, связывающей операции верфей по всему миру. Платформа, построенная на Siemens Xcelerator и Digital Twin Composer, объединит CAD, PLM, цифровое производство, автоматизацию и симуляцию; проект охватывает сборку блоков, сварку, трубопроводные и электромонтажные данные в рамках промышленной метавселенной, использующей физический AI и RL для виртуальной валидации планов до их исполнения на верфи⁴.

Известные пилотные проекты и прототипы цифровых двойников цехов и участков в судостроении (2020–2026)

Внедрение DT в судостроительное производство остается на стадии пилотных проектов и отдельных прототипов, однако их число и масштаб в последние годы заметно возросли. Ниже систематизированы наиболее документированные и релевантные теме настоящей статьи инициативы.

⁴ HD Hyundai selects Siemens Xcelerator for integrated digital shipbuilding platform // CIMdata. 2026. 16 February. URL: <https://www.cimdata.com/de/industry-summary-articles/item/29431-hd-hyundai-selects-siemens-xcelerator-for-integrated-digital-shipbuilding-platform> (дата обращения: 01.06.2026).

Пилотная ячейка верфи NAVANTIA в Ферроле, описанная в 2026 г. Наиболее методологически проработанный пример, реализована в рамках долгосрочной исследовательской программы «Верфь будущего» (O estaleiro do futuro) и объединяет роботизированную сварку, компьютерное зрение, автоматическую визуальную инспекцию и автономные транспортные средства в единой DT-архитектуре, построенной в соответствии с ISO 23247. Дискретно-событийная симуляция (DES) использована как инструмент адаптации традиционных методологий к требованиям процессного DT [17].

Участок резки стали (КНР). Исследование 2025 г., посвященное IoT-управляемому DT для интеллектуального производства в судостроительных цехах, демонстрирует двунаправленную DT-систему на участке резки стали. Система охватывает полный цикл сбора, передачи, хранения и симуляционного анализа данных. Среди перспективных решений выделены гибридные гранично-облачные вычислительные архитектуры для задач, чувствительных к задержкам, и алгоритмы интеллектуального планирования на базе RL [18].

Предстапельная зона верфи (Южная Корея). Прототип DT для размещения блок-секций в предстапельной зоне, реализованный на Unity 3D, использован как среда обучения RL-агента. В отличие от предыдущих примеров, где DT выполняет преимущественно мониторинговые функции, здесь DT непосредственно участвует в формировании производственного плана, замещая собой ручной труд планировщиков [16].

Архитектура DT для ресурсного планирования в ЕТО-верфях (Норвегия). Авторы [21] предложили архитектуру DT для планирования ресурсов на ЕТО-верфях норвежского морского сектора, основанную на кейс-информированном подходе. Работа фокусируется на интеграции DT с существующими ERP- и MES-системами верфи и определяет требования к данным, необходимым для поддержки оперативного планирования в условиях неопределенности [21].

Цифровая платформа HD Hyundai — Siemens (глобальный проект). Анонсированный в феврале 2026 г. проект представляет собой наиболее масштабную на сегодняшний день инициативу по интеграции DT и RL в судостроении. Платформа на базе Siemens Xcelerator призвана связать операции верфей HD Hyundai по всему миру единой цифровой нитью, охватывая CAD, PLM, цифровое производство и симуляцию. Ключевой особенностью является использование физического AI и RL для валидации производственных планов в виртуальной среде до их физического исполнения, что определяет переход от экспериментальных прототипов к промышленному внедрению⁴.

Несмотря на значительный прогресс, в работе [1] выявлен ряд фундаментальных ограничений, сдерживающих широкое внедрение DT на верфях: крайняя конфиденциальность промышленных данных и, как следствие, дефицит открытых датасетов, ограничивающий воспроизводимость и бенчмаркинг; отсутствие общепринятых KPI для сравнительной оценки DT-решений разных архитектур; методологический разрыв между архитектурно-ориентированными DT-работами, акцентирующими интеграцию и синхронизацию данных, и исследованиями, требующими лонгитюдной валидации на уровне всей верфи [1].

Преодоление этих ограничений является необходимым условием для перехода DT и RL из категории перспективных прототипов в разряд промышленного стандарта судостроительного планирования.

Обсуждение (Discussion)

Ранее изложенное дает возможность перейти к сопоставлению трех классов методов: эвристических, метаэвристических и основанных на обучении с подкреплением — по комплексу критериев, критически важных для судостроительного ЕТО-производства.

Сравнительный анализ строится на двух уровнях: качественном и количественном.

Качественное сравнение по ключевым критериям. Качественное сопоставление выполнено по пяти критериям, признанным определяющими для выбора метода производственного планирования в судостроении: адаптивность, масштабируемость, интерпретируемость, вычислительная стоимость обучения и способность функционировать в режиме реального времени [1].

Адаптивность характеризует способность метода перестраивать стратегию планирования при изменении производственных условий: поступлении срочного заказа, отказе оборудования, колебании времени обработки. Эвристические правила диспетчеризации (FIFO, SPT, MST) обладают нулевой адаптивностью: каждое правило жестко оптимизирует один критерий и не корректирует поведение при изменении обстановки [22]. Метаэвристики (генетические алгоритмы, алгоритм имитации отжига) способны перестраивать решение, но требуют полного или частичного перезапуска оптимизационной процедуры, что занимает значительное время и исключает адаптацию в реальном масштабе [1]. RL-агенты, напротив, обучаются стратегии, которая по определению учитывает стохастичность среды, и способны принимать решения за доли секунды без переобучения при локальных возмущениях; при радикальных изменениях (например, запуск нового типа заказа) может потребоваться дообучение, но современные методы трансферного обучения позволяют сократить этот процесс [23].

Масштабируемость отражает способность метода сохранять приемлемое качество решений при росте размерности задачи (числа заказов, единиц оборудования, технологических ограничений). Эвристики линейно масштабируются по времени, но их качество быстро деградирует при усложнении структуры ограничений [1]. Метаэвристики обеспечивают высокое качество решений для задач умеренной размерности, однако при переходе к масштабу целой верфи время поиска становится неприемлемым [1]. RL-методы, обученные на задачах определенного масштаба, демонстрируют многообещающую способность к обобщению: в работе [22] агент DRL, обученный на конфигурации цеха с пятью машинами, показал устойчивое превосходство над правилами диспетчеризации на конфигурациях с 10 и 15 машинами без дополнительного обучения. Для судостроения, где число одновременно обрабатываемых блок-секций может достигать нескольких сотен, способность DRL-агента к обобщению является критическим преимуществом [22].

Интерпретируемость решений интеллектуальной системы — способность объяснить диспетчеру, почему выбрана та или иная последовательность операций, — остается серьезным вызовом для RL. Эвристические правила абсолютно прозрачны: диспетчер всегда понимает, что заказ запущен, потому что он «первый в очереди» или «имеет наименьшее время обработки». Метаэвристики менее прозрачны, но выдаваемое ими расписание может быть проверено на соответствие ограничениям «постфактум». Глубокие нейронные сети, аппроксимирующие стратегию RL-агента, функционируют как «черный ящик», и отсутствие интерпретируемости называется в литературе одним из главных препятствий для их внедрения на верфях [1].

Вычислительная стоимость обучения RL-агента на несколько порядков превышает затраты на однократный запуск GA или расчет по эвристическому правилу. Обучение агента PPO для задачи планирования сборки панельных блок-секций в работе Zhou et al. [22] потребовало около 10 000 эпизодов, что эквивалентно нескольким часам машинного времени. Однако после завершения обучения принятие решения занимает миллисекунды, что делает RL-агента привлекательным для оперативного планирования, где время реакции критично [23].

Способность к работе в реальном времени является, возможно, наиболее сильным дифференцирующим признаком. Классический GA формирует расписание за минуты или десятки минут, что приемлемо для суточного планирования, но не для оперативной диспетчеризации. RL-агент после обучения выдает решение менее чем за 100 мс, что открывает возможность динамической корректировки расписания по мере поступления новых данных от цифрового двойника цеха [24].

Сводка качественного сопоставления приведена в таблице на с. 725.

Количественные оценки. Прямое сравнение трех классов методов на едином судостроительном бенчмарке в литературе отсутствует. Однако сопоставление попарных результатов позволяет составить целостную картину.

RL против эвристических правил. Наиболее систематическое сравнение представлено в работе [24], где агент PPO, обученный в среде DES для задачи планирования сварочного процесса в профильном цехе, сопоставлялся с четырьмя правилами приоритета: SSPT (Shortest

Setup and Processing Time), ATCS (Apparent Tardiness Cost with Setups), MDD (Modified Due Date) и COVERT. На тестовых сценариях с высокой вариабельностью времени обработки PPO-агент обеспечил снижение среднего запаздывания на 18–24 % по сравнению с лучшим из эвристических правил и на 12–15 % — по критерию суммарного времени настройки [24].

Качественное сравнение методов производственного планирования

Qualitative Comparison of Production Planning Methods

Критерий	Эвристики	Метаэвристики (GA, PSO)	RL (PPO, DQN)
Адаптивность	—	○	+
Масштабируемость	○	+	+
Интерпретируемость	+	○	—
Стоимость обучения	+ (отсутствует)	○ (однократный запуск)	— (тысячи эпизодов)
Реальное время	++ (мгновенно)	— (минуты)	++ (миллисекунды после обучения)

Условные обозначения и сокращения:

«+» — высокая/приемлемая; «○» — средняя/ограниченная; «—» — низкая / проблемная;

GA (Genetic Algorithm) — метаэвристический метод оптимизации, вдохновленный теорией естественного отбора Ч. Дарвина;

PSO (Particle Swarm Optimization) — метаэвристический метод глобальной оптимизации, имитирующий групповое поведение животных;

PPO (Proximal Policy Optimization) — алгоритм обучения с подкреплением, который помогает агентам улучшать свои действия, сохраняя стабильность обучения;

DQN (Deep Q-Network) — алгоритм обучения с подкреплением, сочетающий Q-обучение с глубокими нейронными сетями.

Авторы работы [22] для задачи планирования сборочной линии панельных блок-секций показали, что агент на основе графовой изоморфной сети (GIN), обученный методом PPO, превосходит эвристики на 15–22 % по makespan и на 30–40 % — по времени вычисления; особенно выражено преимущество на задачах большого размера (более 50 блок-секций) [22].

RL против метаэвристик. Сравнение RL с генетическими алгоритмами в судостроительном контексте представлено ограниченным числом работ. В смежной области общего машиностроения обзор [23] показал, что RL-подходы превосходят генетическое программирование по качеству расписания на 5–15 % в задачах динамического JSS, но уступают в статических задачах с полной информацией. В судостроении, где доминирует стохастическая неопределенность, динамическое преимущество RL становится определяющим.

DES-оптимизационные гибриды. Фундаментальный обзор [1] позиционирует гибридные DES-оптимизационные фреймворки как наиболее операционально зрелый класс методов, обеспечивающий измеримые улучшения производственных показателей в структурированных условиях. Для задачи оптимизации сборочной линии корпусных блок-секций применение CP-DES-фреймворка позволило сократить makespan на 12–17 % по сравнению с ручным планированием [25]. Эти результаты, однако, получены в детерминированной постановке и не гарантируют робастности при внезапных возмущениях.

DT-RL-интегрированные системы. Публикации 2023–2026 гг. по интеграции DT и RL [16, 20] демонстрируют качественно новые возможности. В работе [16] (2023) RL-агент, обученный в DT-среде (Unity 3D), превзошел экспертов-людей по качеству плана размещения блок-секций примерно на 15 %, а время формирования плана сократилось с нескольких недель до часов [16]. Промышленный альянс HD Hyundai и Siemens (2026)⁴ указывает, что применение физического AI и RL для виртуальной валидации планов в рамках проекта «Future of Shipyard» направлено на сокращение производственных отклонений и связанных с ними задержек⁴, хотя конкретные метрики пока не раскрываются.

Таким образом, можно констатировать, что RL-подходы (особенно PPO и его модификации) устойчиво превосходят эвристики на 12–24 % по критериям makespan и tardiness, а также демонстрируют сопоставимое или превосходящее качество по сравнению с метаэвристическими при радикально (на 1–2 порядка) меньшем времени принятия решения.

Заключение (Conclusion)

Проведенный анализ позволяет выделить ряд фундаментальных пробелов, препятствующих переходу RL-решений из категории перспективных прототипов в разряд промышленного стандарта судостроительного планирования.

Во-первых, острый дефицит публикаций, верифицированных на реальных производственных данных. Как подчеркивается в [1], большинство DT- и AI-ориентированных работ приоритизируют архитектурную интеграцию и синхронизацию данных в ущерб лонгитюдной валидации по общепринятым КРП. Конфиденциальность промышленных данных в судостроении объективно ограничивает доступность открытых датасетов: на момент написания настоящего обзора авторам известен лишь один публично доступный набор данных, адаптированный из реального производства [26].

Во-вторых, отсутствие общепринятых бенчмарков для сравнительной оценки методов в судостроительном контексте. Работы по эвристическим, метаэвристическим и RL используют различные постановки задачи, целевые функции и масштаб производственной системы, что делает прямое сопоставление результатов некорректным [1]. Разработка стандартизированных бенчмарков на основе реальных данных верфей признается одной из первоочередных задач исследовательского сообщества [23].

В-третьих, ограниченная воспроизводимость результатов RL-исследований. Глубокое RL критически зависит от гиперпараметров (архитектура сети, темп обучения, коэффициент дисконтирования), а также от реализации среды обучения. В отсутствие открытого кода и стандартизированных сред воспроизведение заявленных результатов требует значительных усилий, что тормозит накопление и верификацию знаний [23].

В-четвертых, неисследованным остается вопрос об устойчивости RL-агентов к структурным изменениям производственной системы (перепланировка цеха, ввод нового оборудования, изменение номенклатуры заказов). Единичные работы по трансферному обучению [23] показывают принципиальную возможность переноса знаний между задачами, однако систематические исследования применительно к судостроению отсутствуют. Указанные пробелы формируют повестку будущих исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bordbar A. Digitalisation of shipyard production planning: a review of simulation, optimisation, AI, and digital twin methods (2010–2025) / A. Bordbar, M. Tadros, A. Nazemian [et al] // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2026. — Vol. # - Is. #. — Pp. 396. — DOI: 10.3390/jmse14040396.
2. Digitalized Manufacturing Logistics in Engineer-to-Order Operations / J. W. Strandhagen, S.-V. Buer, M. Semini, E. Alfnes / *J. W. Strandhagen* // *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. — 2019. — Vol. 567. — Pp. 23–30. — DOI: 10.1007/978-3-030-30000-5_71.
3. Rearticulating supply chain design and operation principles to mitigate uncertainty in the Norwegian engineer-to-order shipbuilding sector / E. Alfnes, J. Gosling, M. Naim, H. C. Dreyer // *International Journal of Production Economics*. — 2023. — Vol. 262. — Art. 108903. — DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108903.
4. Fatouh T. Shipbuilding Engineer-To-Order Supply Chain: a Systematic Literature Review / T. Fatouh, N. Rego / *T. Fatouh* // *Procedia Computer Science*. — 2023. — Vol. 219. — Pp. 1868–1876. — DOI: 10.1016/j.procs.2023.01.485.
5. Jun D. Constrained Programming Model for the Optimization of Industrial-Scale Scheduling Problems in the Shipbuilding Industry / D. Jun, D. Jones, M. Li // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2023. — Vol. 11, № 8. — Art. 1517. — DOI: 10.3390/jmse11081517.
6. Gong L. A hybrid NSGA-III and Q-learning algorithm for multi-mode and multi-objective resource constrained project scheduling considering two-layered stochastic inputs / L. Gong, Z. Chen, Y. Wang // *Applied Soft Computing*. — 2026. — Art. 115483. — DOI: 10.1016/j.asoc.2026.115483.

7. Zhou Z. A Comparative Simulation Study of Deep Reinforcement Learning and Dispatching Rules for a Complex Job Shop / Z. Zhou, O. Rose // *Simulation in Produktion und Logistik 2025* : 21. ASIM-Fachtagung. — Dresden : Technische Universität Dresden, 2025. — Pp. 387–396. — DOI: 10.25368/2025.237.
8. Планирование процесса изготовления секции корпуса судна / А. Г. Гривачевский, В. Д. Гривачевский, М. Я. Ковалев, А. И. Сухомлинов // *Информатика*. — 2015. — № 4. — С. 49–60. — EDN YLJORG.
9. A Self-Learning Hyper-Heuristic Algorithm Based on a Genetic Algorithm: A Case Study on Prefabricated Modular Cabin Unit Logistics Scheduling in a Cruise Ship Manufacturer / J. Li, R. Dong, X. Wu [et al] // *Biomimetics*. — 2024. — Vol. 9 (№ 9). — Art. 516. — DOI: 10.3390/biomimetics9090516.
10. Akan E. Optimizing Shipbuilding Production Project Scheduling Under Resource Constraints Using Genetic Algorithms and Fuzzy Sets / E. Akan, G. Alkan // *Marine Science and Technology Bulletin*. — 2023. — Vol. 12, № 3. — P. 380–401. — DOI: 10.33714/masteb.1324266.
11. Design patterns of deep reinforcement learning models for job shop scheduling problems / S. Wang, J. Li, Q. Jiao, F. Ma // *Journal of Intelligent Manufacturing*. — 2025. — Vol. 36, № 6. — P. 3741–3759. — DOI: 10.1007/s10845-024-02454-8.
12. Deep reinforcement learning for dynamic distributed job shop scheduling problem with transfers / Y. Lei, Q. Deng, M. Liao, S. Gao // *Expert Systems with Applications*. — 2024. — Vol. 251. — Art. 123970. — DOI: 10.1016/j.eswa.2024.123970.
13. Pugliese V. Hybrid flow shop scheduling through reinforcement learning: a systematic literature review / V. Pugliese, O. F. de A. Ferreira, F. A. Faria // *Proceedings of the 40th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing (SAC '25)*. — New York : ACM, 2025. — P. 1240–1249. — DOI: 10.1145/3672608.3707903.
14. Parallel Deep Reinforcement Learning Framework for Controlling Industrial Assembly Lines / A. Tortorelli, M. Imran, F. Delli Priscoli, F. A. Liberati // *Electronics*. — 2022. — Vol. 11, № 4. — Art. 539. — DOI: 10.3390/electronics11040539.
15. Shi J. Production-logistics collaborative scheduling in dynamic flexible job shops using nested-hierarchical deep reinforcement learning / J. Shi, F. Qiao, J. Liu [et al] // *AI in Engineering*. — 2025. — Vol. 65. — Art. 103195. — DOI: 10.1016/j.aei.2025.103195.
16. Kim Y. H., Yang G. Solving Pre-erection Area Block Placement Problem Using Deep Reinforcement Learning // *Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing (CUTECSA 2022)* / Eds. J. S. Park, L. T. Yang, Y. Pan, J. H. Park. — Singapore : Springer, 2023. — P. 615–621. — (Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 1028). — DOI: 10.1007/978-981-99-1252-0_83.
17. Sánchez-Fernández Á. Framework for the Development of a Process Digital Twin in Shipbuilding: A Case Study in a Robotized Minor Pre-Assembly Workstation / Á. Sánchez-Fernández, E.-D. Vlad-Voinea, J. Pernas-Álvarez [et al] // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2026. — Vol. 14, № 1. — Art. 106. — DOI: 10.3390/jmse14010106.
18. Internet of Things Driven Digital Twin for Intelligent Manufacturing in Shipbuilding Workshops / C. Liang, X. Li, W. Niu, Y. Zhang // *Future Internet*. — 2025. — Vol. 17, № 8. — Art. 368. — DOI: 10.3390/fi17080368.
19. Sun M. Enhancing shipyard transportation efficiency through dynamic scheduling using digital twin technology / M. Sun, C. Liang, D. Chang // *PLOS ONE*. — 2024. — Vol. 19, № 2. — Art. e0297069. — DOI: 10.1371/journal.pone.0297069.
20. Mao R. Systematic Survey of Digital Twin Applications: Transferring Knowledge From Automotive and Aviation to Maritime Industry / R. Mao, Y. Li, G. Li [et al] // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. — 2025. — Vol. 26, № 4. — Pp. 4240–4259. — DOI: 10.1109/TITS.2025.3535593.
21. Romsdal A. Designing a Digital Twin Architecture for Resource Planning in ETO Shipyards: A Case-Informed Approach from the Norwegian Maritime Sector / A. Romsdal, M. Aarhaug, J. O. Strandhagen // *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. — 2025. — Vol. 767. — Pp. 438–452. — DOI: 10.1007/978-3-032-03542-4_30.
22. Zhou T. Solving Panel Block Assembly Line Scheduling Problem via a Novel Deep Reinforcement Learning Approach / T. Zhou, L. Luo, Y. He [et al] // *Applied Sciences*. — 2023. — Vol. 13, № 14. — Art. 8483. — DOI: 10.3390/app13148483.
23. Learn to optimise for job shop scheduling: a survey with comparison between genetic programming and reinforcement learning / M. Xu, Y. Mei, F. Zhang, M. Zhang // *Artificial Intelligence Review*. — 2025. — Vol. 58 (№ 6). — Art. 160. — DOI: 10.1007/s10462-024-11059-9.

24. Nam S. Simulation-based deep reinforcement learning for multi-objective identical parallel machine scheduling problem / S. Nam, Y. Cho, J. H. Woo // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. — 2024. — Vol. 16. — Art. 100629. — DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2024.100629.
25. Scheduling optimization of hull block assembly line using constraint programming and discrete-event simulation / D. H. Kwak, K. Y. Cho, H. C. Yoon, J. H. Woo // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. — 2025. — Vol. 17. — Art. 100675. — DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2025.100675.
26. Chen S. Dataset of Ship Block Scheduling / S. Chen. — Mendeley Data, 2026. — Version 1. — DOI: 10.17632/4ds6t24mx2.1.

REFERENCES

1. Bordbar, A. et al. “Digitalisation of Shipyard Production Planning: A Review of Simulation, Optimisation, AI, and Digital Twin Methods (2010–2025).” *Journal of Marine Science and Engineering* 14.4 (2026). DOI: 10.3390/jmse14040396.
2. Strandhagen, J. W., S.-V. Buer, M. Semini and E. Alfnes. “Digitalized Manufacturing Logistics in Engineer-to-Order Operations.” *Advances in Production Management Systems. Production Management for the Factory of the Future*. Springer International Publishing, 2019: 579–587. DOI: 10.1007/978-3-030-30000-5_71.
3. Alfnes, E., J. Gosling, M. Naim and H. C. Dreyer. “Rearticulating supply chain design and operation principles to mitigate uncertainty in the Norwegian engineer-to-order shipbuilding sector.” *International Journal of Production Economics* 262 (2023): 108903. DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108903.
4. Fatouh, T. and N. Rego. “Shipbuilding Engineer-To-Order Supply Chain: a Systematic Literature Review.” *Procedia Computer Science* 219 (2023): 1868–1876. DOI: 10.1016/j.procs.2023.01.485.
5. Pernas-Álvarez, J. and D. Crespo-Pereira. “A Constrained Programming Model for the Optimization of Industrial-Scale Scheduling Problems in the Shipbuilding Industry.” *Journal of Marine Science and Engineering* 11.8 (2023). DOI: 10.3390/jmse11081517.
6. Zhang, H. et al. “A hybrid NSGA-III and Q-learning algorithm for multi-mode and multi-objective resource constrained project scheduling considering two-layered stochastic inputs.” *Applied Soft Computing* 201 (2026): 115483. DOI: 10.1016/j.asoc.2026.115483.
7. Zhou, Z., and O. Rose. “A Comparative Simulation Study of Deep Reinforcement Learning and Dispatching Rules for a Complex Job Shop.” *Simulation in Produktion und Logistik 2025*. Ed. Sebastian Rank, Mathias Kühn, and Thorsten Schmidt. Dresden: Technische Universität Dresden, 2025.
8. Grivachevskiy, A. G., V. D. Grivachevskiy, M. Ya. Kovalev and A. I. Sukhomlinov. «Planning vessel body section production.» *Informatics* 4(48) (2015): 49–56.
9. Li, J. et al. “A Self-Learning Hyper-Heuristic Algorithm Based on a Genetic Algorithm: A Case Study on Prefabricated Modular Cabin Unit Logistics Scheduling in a Cruise Ship Manufacturer.” *Biomimetics* 9.9 (2024). DOI: 10.3390/biomimetics9090516.
10. Akan, E. and G. Alkan. “Optimizing Shipbuilding Production Project Scheduling Under Resource Constraints Using Genetic Algorithms and Fuzzy Sets.” *Marine Science and Technology Bulletin* 12.3 (2023): 380–401. DOI: 10.33714/masteb.1324266.
11. Wang, S., J. Li, Q. Jiao and F. Ma. “Design patterns of deep reinforcement learning models for job shop scheduling problems.” *Journal of Intelligent Manufacturing* 36.6(2025): 3741–3759. DOI: 10.1007/s10845-024-02454-8.
12. Lei, Y., Q. Deng, M. Liao and S. Gao. “Deep reinforcement learning for dynamic distributed job shop scheduling problem with transfers.” *Expert Systems with Applications* 251 (2024): 123970. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.123970.
13. Pugliese, V., O. Ferreira and F. Faria. “Hybrid Flow Shop Scheduling through Reinforcement Learning: A systematic literature review.” *SAC '25. Association for Computing Machinery*, 2025: 1240–1249. DOI: 10.1145/3672608.3707903.
14. Tortorelli, A., M. Imran, F. Delli Priscoli and F. Liberati. “A Parallel Deep Reinforcement Learning Framework for Controlling Industrial Assembly Lines.” *Electronics* 11.4 (2022). DOI: 10.3390/electronics11040539.
15. Shi, J. et al. “Production-logistics collaborative scheduling in dynamic flexible job shops using nested-hierarchical deep reinforcement learning.” *Advanced Engineering Informatics* 65 (2025): 103195. DOI: 10.1016/j.aei.2025.103195.
16. Kim, Y. H. and G. Yang. “Solving Pre-erection Area Block Placement Problem Using Deep Reinforcement Learning.” *Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing*. Springer Nature Singapore, 2023: 615–621. DOI: 10.1007/978-981-99-1252-0_83.

17. Sánchez-Fernández, N. et al. "Framework for the Development of a Process Digital Twin in Shipbuilding: A Case Study in a Robotized Minor Pre-Assembly Workstation." *Journal of Marine Science and Engineering* 14.1 (2026). DOI: 10.3390/jmse14010106.
18. Liang, C., X. Li, W. Niu and Y. Zhang. "Internet of Things Driven Digital Twin for Intelligent Manufacturing in Shipbuilding Workshops." *Future Internet* 17.8 (2025). DOI: 10.3390/fi17080368.
19. Sun, M., C. Liang and D. Chang. "Enhancing shipyard transportation efficiency through dynamic scheduling using digital twin technology." *PLOS ONE* 19.2 (2024): 1–27. DOI: 10.1371/journal.pone.0297069.
20. Mao, R. et al. "A Systematic Survey of Digital Twin Applications: Transferring Knowledge From Automotive and Aviation to Maritime Industry." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 26.4 (2025): 4240–4259. DOI: 10.1109/TITS.2025.3535593.
21. Romsdal, A., M. Aarhaug and J. O. Strandhagen. "Designing a Digital Twin Architecture for Resource Planning in ETO Shipyards: A Case-Informed Approach from the Norwegian Maritime Sector." *Advances in Production Management Systems. Cyber-Physical-Human Production Systems: Human-AI Collaboration and Beyond*. Springer Nature Switzerland, 2026: 438–452. DOI: 10.1007/978-3-032-03542-4_30.
22. Zhou, T. et al. "Solving Panel Block Assembly Line Scheduling Problem via a Novel Deep Reinforcement Learning Approach." *Applied Sciences* 13.14 (2023). DOI: 10.3390/app13148483.
23. Xu, M., Y. Mei, F. Zhang and M. Zhang. "Learn to optimise for job shop scheduling: a survey with comparison between genetic programming and reinforcement learning." *Artificial Intelligence Review* 58.6 (2025): 160. DOI: 10.1007/s10462-024-11059-9.
24. Nam, S., Y.-I. Cho and J. H. Woo. "Simulation-based deep reinforcement learning for multi-objective identical parallel machine scheduling problem." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 16 (2024): 100629. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2024.100629.
25. Kwak, D. H., K.-Y. Cho, C. Ryu and J. H. Woo. "Scheduling optimization of hull block assembly line using constraint programming and discrete-event simulation." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 17 (2025): 100675. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2025.100675.
26. MendeleyData. Chen S. "Dataset of Ship Block Scheduling" (2026). Version 1. DOI: 10.17632/4ds6t24mx2.1.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Михаил Николаевич —
кандидат технических наук, профессор
ФГБУ ВО «Балтийский государственный
технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д. Ф. Устинова»
190005, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
1-я Красноармейская, ул., д. 1,
e-mail: grigorievmn@ya.ru

Королева Елена Арсентьевна —
доктор экономических наук, профессор,
ФГБУ ВО «Государственный университет
морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kea_56@mail.ru

Уваров Сергей Алексеевич —
доктор экономических наук, профессор
ФГБУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
экономический университет»
191023, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
наб. канала Грибоедова, д. 30-32, литер А
e-mail: s_uvarov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigoriev, Mikhail N., —
Candidate of Technical Sciences, Professor,
Baltic State Technical University "Voenmekh"
named after D. F. Ustinov
1, 1st Krasnoarmeyskaya Street, Saint Petersburg,
190005, Russian Federation
e-mail: grigorievmn@ya.ru

Koroleva, Elena A. —
Doctor of Economics, Professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7, Liter A, Dvinskaya str, Saint-Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: kea_56@mail.ru,

Uvarov, Sergey. A. —
Doctor of Economics, Professor,
St. Petersburg State University of Economics
30–32, letter A, nab. Griboyedov Canal, St. Petersburg,
191023, Russian Federation
e-mail: s_uvarov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 08 июня 2026 г.
Received: Jun 8, 2026.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-730-743

EDN LANSNR

УДК: 629.12(075.4)

СНИЖЕНИЕ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК СУДОВ НА БИОРЕСУРСЫ МОРЕЙ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

К. Ю. Федоровский, Н. К. Широких

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Российская Федерация

Темой работы является исследование проблемы минимизации или полного исключения негативно-го воздействия используемых при этом судов на биоресурсы северных морей в условиях возрастающей роли Северного морского пути России и планируемого при этом увеличения грузоперевозок. Отмечается, что имеющиеся на судах системы охлаждения энергетических установок потребляют для своей работы значительное количество воды из окружающей акватории. Показано, что попавшие в систему планктон, икринки и рыбная молодь под воздействием механического и теплового факторов практически полностью погибают. Обращается особое внимание, что в результате уничтожается основа пищевой цепочки, что неизбежно ведет к обеднению биоресурсов северных морей и снижению рыбной продуктивности. Сделан вывод о необходимости поиска и разработки методов минимизации, а по возможности полном исключении указанного негативного воздействия. В результате проведенных исследований намечены пути решения данной проблемы, среди которых терморегулирование системы, использование в составе систем насосов с частотно регулируемыми приводами и переход на полностью замкнутые системы. Для каждого из указанных подходов определены имеющиеся ограничения, преимущества и недостатки. Северные моря, характеризующиеся низкими температурами воды, создают дополнительные возможности реализации предложенных подходов. Также принимается во внимание, что энергетическая установка зачастую эксплуатируется на частичных нагрузках, что снижает требуемый теплоотвод системой охлаждения. С использованием существующей нормативной методики исчисления размеров вреда, причиненного водным биологическим ресурсам и предложенного в работе интегрального показателя эффективности систем охлаждения судовых энергетических установок, учитывающего технические и экологические показатели, сопоставлены рассматриваемые варианты систем для условий различных морей.

Ключевые слова: Северный морской путь, биологические ресурсы, планктон, система охлаждения, судовая энергетическая установка, терморегулирование, обшивочный теплообменник, интегральный показатель, частотно регулируемый привод, эффективность.

Для цитирования:

Федоровский, К. Ю. Снижение негативного воздействия систем охлаждения энергоустановок судов на биоресурсы морей северного морского пути / К. Ю. Федоровский, Н. К. Широких // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 4. С. 730–743. EDN LANSNR. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-730-743.

REDUCING THE NEGATIVE IMPACT OF SHIP POWER PLANT COOLING SYSTEMS ON THE BIOLOGICAL RESOURCES OF THE SEAS ALONG THE NORTHERN SEA ROUTE

K. Yu. Fedorovskiy, N. K. Shirokikh

Sevastopol State university, Sevastopol, Russian Federation

The paper examines the problem of minimizing or completely eliminating the negative impact of vessels on the biological resources of the northern seas in the context of the growing importance of

Russia's Northern Sea Route and the planned increase in cargo transportation. It is noted that ship power plant cooling systems consume significant amounts of water from the surrounding sea area. It is shown that plankton, fish eggs, and juvenile fish entering the system are almost completely killed by mechanical and thermal effects. Particular attention is drawn to the fact that this destroys the basis of the food chain, which inevitably leads to the depletion of the biological resources of the northern seas and a decrease in fish productivity. It is concluded that methods for minimizing and, where possible, completely eliminating this negative impact need to be identified and developed. The study identifies possible solutions to this problem, including temperature control of the system, the use of pumps with variable-frequency drives, and a transition to fully closed-loop cooling systems. The limitations, advantages, and disadvantages of each of these approaches are identified. The northern seas, characterized by low water temperatures, provide additional opportunities for implementing the proposed approaches. It is also taken into account that the power plant is often operated at partial loads, which reduces the heat rejection required from the cooling system. Using the existing regulatory methodology for calculating damage caused to aquatic biological resources and the integral performance indicator for ship power plant cooling systems proposed in the study, which takes into account technical and environmental indicators, the considered cooling-system options are compared for the conditions of different seas.

Keywords: Northern Sea Route, biological resources, plankton, cooling system, ship power plant, temperature control, ship hull heat exchanger, integral performance indicator, variable-frequency drive, efficiency.indicator, variable frequency drive, efficiency.

For citation:

Fedorovskiy, Konstantin Yu. and N. K. Shirokikh. "Reducing the negative impact of ship power plant cooling systems on the biological resources of the seas along the northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.4 (2026):730–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-730-743.

Введение (Introduction)

Одной из важнейших транспортных артерий Российской Федерации является Северный морской путь (СМП), который проходит через Арктическую зону страны и представляет собой кратчайший путь между портами европейской части и Дальним востоком. Протяженность СМП составляет около 5600 км. В настоящее время по СМП ежегодно курсируют сотни судов¹. В 2024 г. соответствующий грузооборот достиг почти 40 млн т и имеет явно выраженную тенденцию роста.

В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 1 августа 2022 г. № 2115-р² [2] грузопоток в 2035 г. должен достигнуть 220 млн т, что обуславливает необходимость создания флота морских судов, способных работать в данном регионе³. Предполагается построить 120–160 судов различного назначения ледового класса.

Моря СМП с экологической точки зрения относятся к числу наиболее уязвимых регионов мира. В [1] указывается, что наблюдается тенденция снижения запасов водных биологических ресурсов арктических морей. Имеется четкое понимание⁴, что необходим баланс между сохранением экосистемы этих морей и хозяйственной деятельностью, связанной с эксплуатацией судов⁵. На развитие СМП Россия планирует потратить до 2035 г. примерно 1,8 трлн руб.⁶, из них 400 млрд руб. — на безопасность судоходства, включая решение экологических проблем.

¹ Флот северного морского пути. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ecoshp.ru/blog/flot-severnogo-morskogo-puti/> (дата обращения: 14.11.2025 г.).

² Распоряжение Правительства РФ от 1 августа 2022 г. № 2115-р Об утверждении плана развития Северного морского пути на период до 2035 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405010751/> (дата обращения: 14.11.2025 г.).

³ Чтобы не сбиться с Севморпути: сколько судов нужно построить к 2030 году [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://strana-rosatom.ru/2023/10/02/chtoby-ne-sbitsya-s-sevmorputi-skolko/> (дата обращения: 15.11.2025 г.).

⁴ Осень, что же будет с Арктикой и с нами: глобальное потепление и Севморпуть глазами ученых [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://tass.ru/opinions/18907735> (дата обращения 15.11.2025 г.).

⁵ Северный морской путь 2050 — тихая гавань глобальной логистики [Электронный ресурс] Доступ: <https://roscongress.org/materials/severnyu-morskoy-put-2050-tikhaya-gavan-globalnoy-logistiki/> (дата обращения: 15.11.2025 г.).

⁶ Что такое Северный морской путь. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://t-j.ru/northern-sea-route-guide/> (дата обращения: 14.11.2025 г.).

С учетом планируемого роста грузоперевозок по СМП и увеличения количества судов, задействованных в данных перевозках, становится актуальным рассмотрение проблемы минимизации отрицательного воздействия на биологические ресурсы северных морей. Основные требования по предотвращению негативного воздействия судов на окружающую среду, в том числе моря, изложены в Международной морской конвенции МАРПОЛ 73/78 [3]. Этот документ охватывает все виды загрязнений, источниками которых являются нефтепродукты, сточные воды, мусор и отработавшие газы. Однако при этом приняты во внимание не все факторы негативного воздействия судов на биологические ресурсы морей [4, 5].

В настоящее время наибольшее распространение получили двухконтурные разомкнутые системы охлаждения [6], в которых забортная вода охлаждает пресную воду, циркулирующую по замкнутому контуру через охлаждаемое энергетическое оборудование. Забор воды из акватории обычно осуществляется центробежными насосами, как правило постоянной производительности. Так, например данный показатель для ледостойкой платформы ЛСП-1 составляет 1600 м³/ч, для рефрижераторного судна Zenit — 460 м³/ч, для многоцелевого судна Амке — 160 м³/ч. Суммарное годовое потребление морской воды судами, функционирующими в морях СМП, оказывается огромным.

На основании ранее изложенного становится очевидным, что интенсивное освоения СМП сопряжено с рядом факторов негативного воздействия на морские биоресурсы. Необходимость их сохранения ставит перед судостроением актуальную задачу поиска эффективных решений, минимизирующих или полностью исключаящих такое воздействие.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Выполненный всесторонний анализ позволил определить перспективы развития СМП в аспекте транспортировкой грузов посредством морских судов, а также необходимое для этого количество судов. Определены состояние морских биоресурсов и наблюдающиеся негативные тенденции.

Проведенные экспериментальные исследования непосредственно на судах различного назначения позволили оценить потребление принимаемой из акватории морской воды, используемой для охлаждения СЭУ. Также определены температурные параметры работы систем охлаждения на этой основе указаны основные факторы негативного воздействия на биоресурсы северных морей.

С использованием методов моделирования процессов теплоотвода в системах охлаждения определены возможности снижения потребления морской воды с учетом фактора низких температур воды в северных морях. Разработаны математические модели предлагаемых вариантов систем, позволяющие определить их стоимость, а также энергетические затраты на обеспечение работы, а также отводимый системой тепловой поток и ущерб, причиняемый морским биоресурсам. Для численной оценки последнего использовалась методика исчисления размеров вреда, причиненного водным биологическим ресурсам, утвержденная приказом Министерства сельского хозяйства РФ от 31 марта 2020 г. № 167 [7]. В исследовании рассмотрены Баренцево и Белое моря, а также для возможности проведения дополнительного анализа и сравнения — Черное море.

Сравнение различных вариантов систем охлаждения выполнено на базе интегрального показателя, методически построенного по принципу приведенных затрат. Этот показатель реализует принципы комплексного подхода, включающего многоаспектность, многовариантность и взаимосвязанность. Показатель приведен к безразмерному виду посредством разработанной методики⁷, реализующей стоимостно-энергетический подход к оценке эффективности систем охлаждения. На этой основе сопоставлены различные варианты систем, отмечены их преимущества и недостатки, а также даны рекомендации для использования на судах, предназначенных для освоения СМП.

⁷ Федоровский К. Ю. Теплопередача и теплообменные аппараты : учебник / К. Ю. Федоровский, Н. К. Гриценко. Москва : ИНФРА-М, 2025. 214 с. : ил. (Высшее образование). DOI 10.12737/2170972. ISBN 978-5-16-020382-9. Текст : электронный. URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2170972> (дата обращения: 16.11.2025 г.).

Результаты (Results)

В забираемой из акватории воде содержится планктон, являющийся, как хорошо известно, основой пищевой цепочки, формирующейся в морях и океанах [8]. Наибольшее количество планктона (55–90 %) находится в поверхностном слое на глубинах примерно до 50 м. Именно с глубин до 10–20 м забирается заборная вода для обеспечения работы систем охлаждения СЭУ (рис. 1). Планктон, размеры которого изменяются от нескольких микрон до нескольких миллиметров, не может противостоять создаваемой насосом силе всасывания, а используемые на судах фильтры не задерживают его, поскольку проходные отверстия фильтров (обычно 2–4 мм в диаметре) больше размеров планктона. Икринки, личинки и рыбная молодь зачастую также имеют размеры, меньшие или сопоставимые с проходным отверстием фильтров.

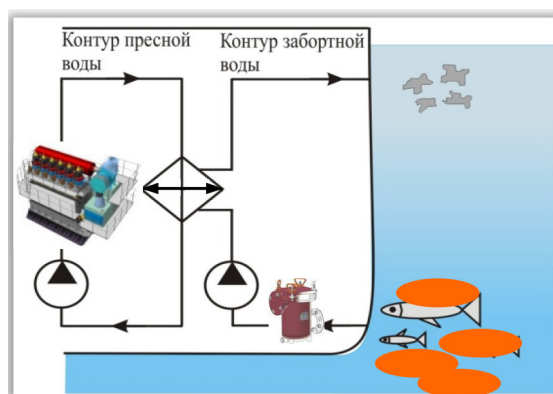


Рис. 1. Схема традиционной двухконтурной разомкнутой системы охлаждения

Fig. 1. Schematic of a Conventional Two-Circuit Open Cooling System

Попав в систему охлаждения, данные организмы подвергается губительным механическому и тепловому воздействиям. Механическое воздействие осуществляется при прохождении практически всех элементов системы. Однако основное негативное влияние оказывают насосы, обычно центробежного типа. Крыльчатка такого насоса, вращаясь с высокой скоростью, повреждает большую часть этих организмов. На рис. 2 в качестве примера показан планктон до входа в систему и после нее. Совершенно очевидно, что после прохождения системы он уже практически нежизнеспособен.

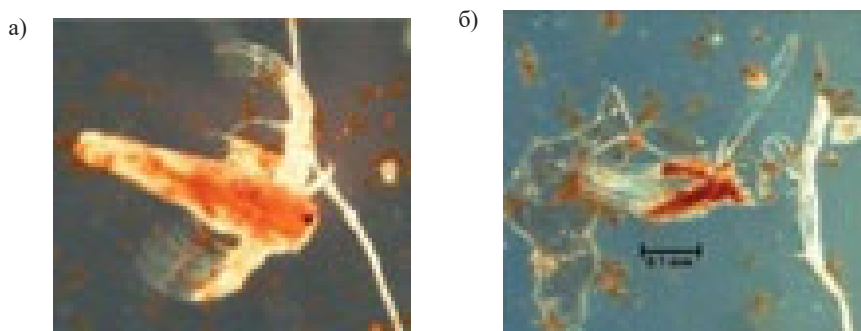


Рис. 2. Губительное воздействие системы охлаждения на планктон:

а — на входе; б — на выходе

Fig. 2. Lethal Effect of the Cooling System on Plankton: a — at the Inlet; b — at the Outlet

Тепловое воздействие осуществляется в многочисленных теплообменных аппаратах (масло- и водоохладители, охладители наддувочного воздуха и др.), через которые проходит морская вода, повышая свою температуру. Для различных видов рыб взрослых рыб губительным является скачок

температуры 4–20 град⁸. Для планктона, икринок и рыбной молоди этот диапазон еще уже. Проведенные экспериментальные исследования на различных судах показали (данные приведены в таблице), что нагрев забортной воды в системе может достигать 13–19 град. Таким образом, для большинства организмов такой нагрев воды также оказывается губительным.

Таблица 1

Нагрев забортной воды в системе охлаждения различных судов

Table 1

Seawater Temperature Rise in the Cooling Systems of Various Vessels

Судно	Установленная мощность, кВт	Нагрев забортной воды $\delta_{зв}$, град
Рефрижератор Zenit	7 138	7–18
Рефрижератор Wild Cosmos	9 627	16–19
Рефрижератор Wild Plone	3 642	11–13
Многофункциональное Amke	3 840	9–13
Рефрижератор «Ангара»	3 089	2–8
Самоходный плавкран «Нептун-3»	1 500	5–10
Буксир «Пелла»	746	9–15

Механизм теплового воздействия с биологической точки представляется следующим образом. Даже в случае кратковременного нахождения рассматриваемых организмов в зоне скачка температуры воды их жаберные лепестки «обжигаются»⁹. В результате этого они становятся анемичными и покрываются слизью. Далее происходит разрыв капилляров и кровотечение. Спустя некоторое время они подвергаются некротическому распаду и разрушению. На жабрах поселяются бактерии, развивается патологический процесс, и наступает гибель.

Системы охлаждения СЭУ по своему построению и комплектации схожи с системами охлаждения тепловых электростанций, расположенных на берегу морей. Они также оказывают негативное воздействие на морские биоресурсы. Однако, в отличие от судостроения, результаты такого негативного воздействия исследованы специалистами данной отрасли более тщательно. В [9, 10] указано, что для данных объектов механическое и тепловое воздействия приводят к гибели 70–90 % планктона. В некоторых случаях этот показатель достигал 100 %. Проведенные исследования на тепловой электростанции Sizewell, которая находится на морском побережье Великобритании, показали, что уничтожается около $2 \cdot 10^{10}$ икринок рыб и $4,9 \cdot 10^7$ мальков рыб [11].

Таким образом, в силу указанных причин системы охлаждения СЭУ интенсивно уничтожают планктон, икринки, мальков и рыбную молодь, формирующие основу пищевой цепочки, что, в конечном счете, негативно сказывается на рыбных ресурсах морей СМП. В этом аспекте весьма показательным является следующий пример. В Черном и Азовском морях имел место случай уничтожения планктона за счет завезенного с балластными водами судов организма под названием *мнемиопсис* (*Mnemiopsis leidyi*), который интенсивно размножается, потребляя при этом в качестве пищи планктон¹⁰. Согласно приведенным данным, за счет имевшего место уничтожения

⁸ Влияние экологических и зоогигиенических условий на возникновение болезней у рыб, характер их течения и распространение. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://arctikfish.com/index.php/bolezniryb/114vliyanie-ekologicheskikh-i-zoogigienicheskikh-uslovij-na-vozniknovenie-boleznej-u-ryb-kharakter-ikh-techeniya-i-rasprostranenie> (дата обращения: 16.11.2025 г.).

⁹ Влияние экологических и зоогигиенических условий на возникновение болезней у рыб, характер их течения и распространение. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://arctikfish.com/index.php/bolezniryb/114vliyanie-ekologicheskikh-i-zoogigienicheskikh-uslovij-na-vozniknovenie-boleznej-u-ryb-kharakter-ikh-techeniya-i-rasprostranenie> (дата обращения: 16.11.2025 г.).

¹⁰ Чернова Н. М. Общая экология / Н. М. Чернова, А. М. Былова. М.: Дрофа, 2004. 411 с. ISBN: 5-7107-7427-8.

планктона в результате был нанесен ущерб рыбному промыслу на сумму около 18–28 млрд руб.¹¹. Необходим поиск путей минимизации потребления морской воды системами СЭУ, а в идеале — полный отказ от такого потребления.

На рис. 3 представлена зависимость удельного потребления забортной воды $W_{зв}$, м³, приходящегося на единицу теплоотвода Q , Дж, системой в зависимости от температуры воды в акватории. Данные получены в результате исследования работы систем охлаждения различных судов при нахождении их в морях с различной температурой. Видно, что эта величина для различных судов изменяется в широких пределах и мало зависит от температуры воды в акватории.

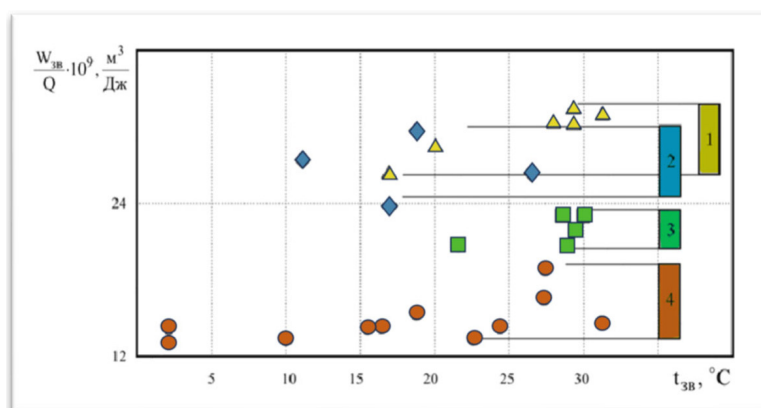


Рис. 3. Зависимость удельного потребления забортной воды $W_{зв} / Q$ от температуры забортной воды $t_{зв}$ для судов:

1 — ▲ — «Ангара», 2 — ◆ — «Нептун-3», 3 — ■ — Wild Plone; 4 — ● — Wild Cosmos
Fig. 3. Specific Seawater Consumption $W_{зв}/Q$ versus Seawater Temperature $t_{зв}$ for the Vessels:
1 — ▲ — Angara; 2 — ◆ — Neptun-3; 3 — ■ — Wild Plone; 4 — ● — Wild Cosmos

В соответствии с существующими требованиями, системы охлаждения проектируется с учетом обеспечения теплоотвода, соответствующего максимальной мощности двигателя и максимальной температуре забортной морской воды, равной 32 °С. Однако для северных морей даже летом температура существенно ниже. Так, на небольших глубинах¹² в Северном море она составляет 1–9 °С, в Баренцевом — 15 °С, в Карском — 5–7 °С. Поэтому для сравнительно небольшого количества судов, которые постоянно эксплуатируются в северных морях (например, ледоколы) данное значение максимальной расчетной температуры морской воды может быть несколько снижено. Однако для большинства транспортных судов, которые функционируют не только в районах СМП, но и в более теплых морях, эта норма остается неизменной. Следует также иметь в виду, что в процессе эксплуатации мощность двигателя может быть меньше максимальной, что снижает величину теплоотвода, который должен быть обеспечен системой и осуществляется в теплообменниках.

Отвод теплоты Q в забортную воду, циркулирующую в системе, осуществляется в теплообменниках. Из теории тепломассообмена известно, что значение Q , Вт, зависит от температурного напора Δt между охлаждаемым и охлаждающим (морская вода) теплоносителями:

$$Q = KF\Delta t,$$

где K — коэффициент теплопередачи теплообменника, Вт/(м²·К);

F — площадь теплопередающей поверхности теплообменника,

м²; Δt — температурный напор между охлаждаемым в теплообменнике теплоносителем и забортной водой, °С.

¹¹ Новый вид гребневика проник в Каспийское море. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://m.polit.ru/news/2020/12/10/ps_beroe_ovata/ (дата обращения: 16.11.2025 г.).

¹² Добровольский А. Д. Моря СССР / А. Д. Добровольский, Б. С. Залогин. Москва: Изд-во МГУ, 1982. 192 с. ISBN 978-5-91137-244-6.

Кроме того, известно, что значение K зависит, среди прочего, от коэффициента теплоотдачи в теплообменнике со стороны забортной воды $\alpha_{зв}$. Значение последнего, бесспорно, связано со скоростью морской воды в теплообменнике, а следовательно, и с производительностью P используемого насоса. Из теории тепломассообмена также известно, что значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{зв}$ пропорционально значению расхода забортной воды P , м³/с, в степени 0,8. Этот же теплоотвод Q , Вт, идет на нагрев охлаждающей морской воды

$$Q = \rho \cdot C_p \cdot (t''_{зв} - t'_{зв}),$$

где ρ — плотность воды, кг/м³;

C_p — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

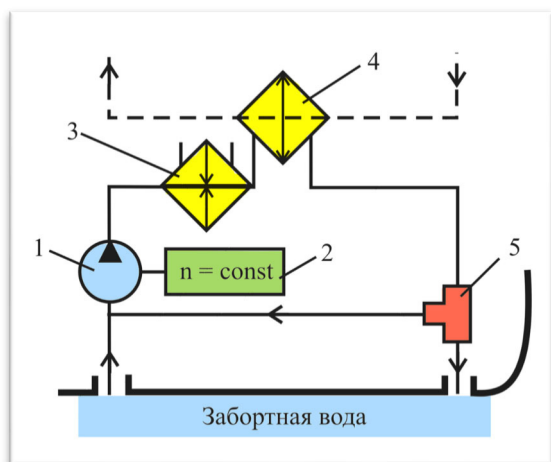
$t'_{зв}$ и $t''_{зв}$ — соответственно температура забортной воды на входе и выходе охлаждаемого оборудования, °С.

Следовательно, для судов, находящихся в морях, характеризующихся низкой температурой воды в акватории, а также при частичном использовании установленной мощности СЭУ имеется принципиальная возможность снижения потребления системой расхода забортной воды. Этого можно достичь следующими способами.

Первый способ связан с терморегулированием контура забортной воды. При этом часть воды перепускается в системе посредством терморегулятора 5 (рис. 4, а) обеспечивающего постоянство температуры воды на входе в теплообменники 3, 4. Насос 1 имеет постоянную частоту вращения и соответственно производительность. Данный способ снижает потребление забортной воды, но практически не снижает энергетических затрат на привод насоса.

Второй способ предусматривает использование в системе частотно регулируемого привода (ЧРП), посредством которого осуществляется регулирование производительности насоса за счет изменения частоты вращения его крыльчатки ($n = \text{var}$) — рис. 4, б. Такие приводы выпускаются промышленностью и находят все большее применение. Датчики температуры воды, расположенные на охлаждаемом оборудовании, формируют управляющий сигнал на блок управления частотой вращения электродвигателя насоса. Снижение требуемого теплоотвода или понижение температуры забортной воды приводит к снижению частоты вращения насоса и соответствующего потребления забортной морской воды P .

а)



б)

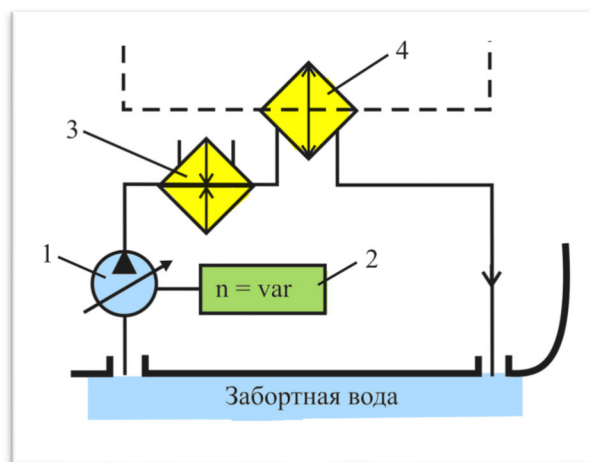


Рис. 4. Системы охлаждения с перепуском (а) и с регулируемой частотой вращения насоса (б):

1 — насос; 2 — электродвигатель; 3 и 4 — теплообменники системы; 5 — терморегулятор
Fig. 4. Cooling Systems with Bypass (a) and Variable Pump Speed (b): 1 — Pump; 2 — Electric Motor; 3 and 4 — System Heat Exchangers; 5 — Temperature Controller

В отличие от первого способа, при котором потребляемая насосом мощность остается практически неизменной, в данном случае уменьшение температуры морской воды или мощности двигателя сопровождается снижением мощности на привод насоса, что является несомненным преимуществом, так как способствует соблюдению требований главы 4 приложения VI Конвенции МАРПОЛ 73/78 [3] в отношении обеспечения энергоэффективности судов.

В Водном кодексе РФ¹³ для вновь создаваемых и реконструируемых объектов, влияющих на состояние водных ресурсов, указывается на необходимость применения замкнутых технологий, в данном случае — замкнутых систем охлаждения, полностью исключаящих прием забортной воды. В этом случае могут быть применены различные подходы¹⁴. Для судов ледового плавания предпочтительными являются устройства теплоотвода, которые не нарушают обводов корпуса судна. Таковыми являются судовые обшивочные теплообменные аппараты (СОТОА), отводящие теплоту через судовую обшивку (рис. 5, а). При этом полностью исключается необходимость приема системой охлаждения забортной морской воды.

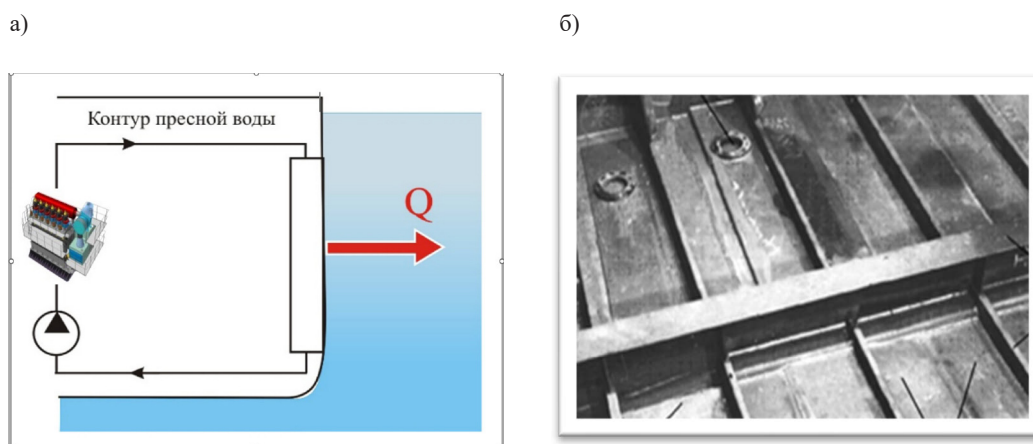


Рис. 5. Судовой обшивочный теплообменный аппарат:

а — схема замкнутой системы с СОТОА; б — фото СОТОА на завершающем этапе изготовления
Fig. 5. Ship Hull Heat Exchanger: a — Schematic of a Closed-Loop System with a Ship Hull Heat Exchanger;
b — Photograph of the Ship Hull Heat Exchanger at the Final Stage of Manufacture

Впервые в отечественной практике замкнутые системы охлаждения с такими аппаратами (рис. 5, б) были применены на самоходных плавкранах проекта 15201 грузоподъемностью 500 т. Первый из этих плавкранов был направлен для работы в северных морях России и получил положительные отзывы в отношении эффективности эксплуатации такой системы охлаждения. Следует отметить, что изготовление такой системы и СОТОА не потребовало от судостроительного завода применения специальных технологий и оборудования.

Обсуждение (Discussion)

Существуют различные варианты систем, обеспечивающих минимизацию негативного воздействия на биоресурсы морей и даже полное исключение такого воздействия. Каждый вариант имеет свои преимущества и недостатки. Их сопоставление и выбор оптимального при заданных условиях эксплуатации судна могут быть выполнены на основе интегральной оценки их эффективности, включающей основные показатели системы. Совершенно очевидно, что интегральный показатель должен включать экологическую составляющую, отражающую негативное влияние на биоресурсы морей. Это может быть реализовано с помощью утвержденной приказом Министерства

¹³ Водный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/9014361> (дата обращения: 16.11.2025 г.).

¹⁴ 19.Фильтры забортной воды. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.inmor.su/12-003.html> (дата обращения: 16.11.2025 г.).

сельского хозяйства РФ от 31 марта 2020 года № 167 методики исчисления размера вреда, причиненного водным биологическим ресурсам¹⁵. Данная методика позволяет определить размер причиненного вреда, выраженного в весовой оценке уничтоженного конкретного вида рыб вследствие уничтожения планктона как пищевой базы для этих рыб. В ходе исследований она была адаптирована для судов с учетом параметров работы систем охлаждения.

Для систем охлаждения, помимо экологического показателя $C_{эк}$, руб., характеризующего наносимый ущерб, важными показателями являются: построечная стоимость $C_{с.п.}$, руб., энергетические затраты на привод насосов $\mathcal{E}_н$, Дж, и отводимая системой теплота $\mathcal{E}_q$, Дж. Поскольку указанные величины являются разнородными, это затрудняет формирование интегрального показателя (ИП), объединяющего данные величины. Для решения данной проблемы использовался стоимостно-энергетический подход¹⁶. В результате после ряда преобразований все указанные величины становятся однородными, обеспечив тем самым безразмерность ИП.

Для системы охлаждения C_Q является полезным результатом, а $C_{с.п.}$, C_n и $C_{эк}$ являются затратной частью. Поэтому интегральный показатель, методически построенный по принципу приведенных затрат, представляется следующим образом:

$$\text{ИП} = \frac{C_{с.п.} + C_n + C_{эк}}{C_Q} = k_{с.п.} + k_n + k_{эк}.$$

Естественно, чем меньше значение ИП, тем лучше система. Такая форма интегрального показателя удобна, поскольку позволяет определить и проанализировать его составляющие: $k_{с.п.}$, k_n и $k_{эк}$:

$$k_{эк} = \Sigma(D_i \cdot \Pi_{pi}) \cdot \zeta \cdot \sigma \cdot z \cdot Ne \frac{\tau_\phi}{2160 \cdot \tau_\phi \cdot Ne};$$

$$Q_n^p$$

$$k_{с.п.} = \frac{(C_{с.п.} \cdot E)}{2160 \tau_\phi \cdot Ne} \cdot \Pi_\tau;$$

$$Q_H^p$$

$$k_n = \frac{\left(\frac{3600a \cdot \tau_\phi \cdot Ne}{Q_n^p} \cdot \Pi_\tau \right)}{2160 \cdot \tau_\phi \cdot Ne} \cdot \Pi_\tau,$$

$$Q_n^p$$

где Ne — мощность энергетической установки;

D_i — весовое выражение потерь конкретных рыб при потреблении 1 м³ морской воды;

Π_{pi} — цена рыбы,

Π_τ — цена топлива;

Q_n^p — его теплотворная способность,

τ_ϕ — время фактической работы системы;

ζ — доля времени нереста по отношению к τ_ϕ ;

σ — доля времени нахождения в районе интенсивного рыболовства;

z и a — соответственно удельное потребление морской воды и энергии на привод насоса в зависимости от Ne ;

E — коэффициент нормативных отчислений.

¹⁵ Водный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/9014361> (дата обращения: 16.11.2025 г.).

¹⁶ Федоровский, К. Ю. Теплопередача и теплообменные аппараты : учебник / К. Ю. Федоровский, Н. К. Грищенко. Москва : ИНФРА-М, 2025. 214 с. : ил. DOI 10.12737/2170972. ISBN 978-5-16-020382-9. Текст : электронный. URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2170972> (дата обращения: 16.11.2025 г.).

В ходе исследований, применительно к широко используемой в настоящее время традиционно используемой разомкнутой двухконтурной системе охлаждения, было определено значение $k_{эк}$ для Баренцева и Белого морей. С целью возможности некоторого сравнения данное значение было определено и для Черного моря. Поскольку отводимая системой теплота Q и мощность СЭУ не однозначно связаны между собой, то значение $k_{эк}$ не зависит от мощности энергетической установки. В результате было определено, что для Баренцева моря $k_{эк} = 0,78$, для Белого — 0,02, для Черного моря — 0,28. Полученные значения $k_{эк}$ отражают хорошо известный факт высокой рыбной продуктивности Баренцева моря и очень низкой Белого моря. Следует заметить, что данный вариант системы исключает описанные ранее мероприятия по снижению приема забортной морской воды и негативного воздействия на биоресурсы. Так, для разомкнутых систем охлаждения было указано, что для достижения поставленной цели могут быть использованы два метода: первый — перепуск воды (рис. 4, а) за счет терморегулирования, второй — использование насосов с регулируемой частотой вращения посредством ЧРП (рис. 4, б).

На рис. 6 приведены значения $k_{эк}$ для систем, реализующих указанные методы. Как видно, они оказываются весьма эффективными, поскольку по мере понижения температуры забортной воды $t_{зв}$ существенно снижаются значения $k_{эк}$ (напомним, что чем ниже значение ИП и $k_{эк}$, тем лучше система). Причем, чем продуктивнее море, тем больший эффект достигается. Применительно к Баренцеву морю, при температуре морской воды 5 °С, значение $k_{эк}$ снижается с 0,78 до 0,1, т. е. почти в 8 раз. Для Белого моря, имеющего очень низкую биопроductивность, такое снижение оказывается практически незаметным (невидимым на графике).

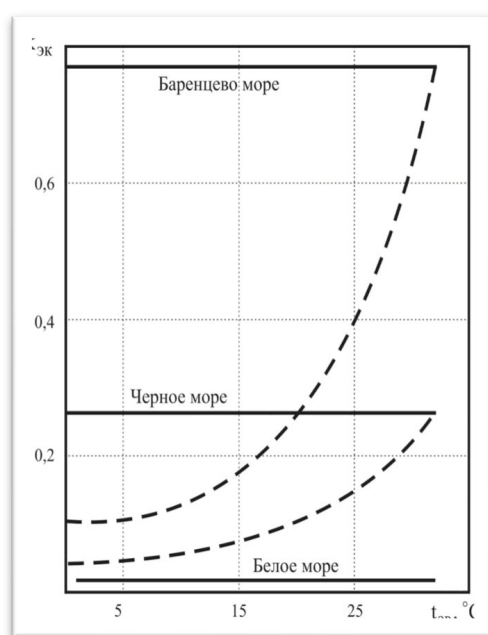


Рис. 6. Значения экологической составляющей $k_{эк}$ в зависимости от температуры морской воды $t_{зв}$ для различных морей и различных вариантов построения систем:

——— традиционная разомкнутая система; ----- система с перепуском или ЧРП
Fig. 6. Values of the Environmental Component $k_{эк}$ versus Seawater Temperature $t_{зв}$ for Different Seas and Different Cooling-System Configurations: Solid Line — Conventional Open System; Dashed Line — System with Bypass or Variable-Frequency Drive

Данная картина не может не отразиться на ИП. Соответствующие графические зависимости показаны на рис. 7. В результате сравнения численных значений ИП и значений $k_{эк}$, являющихся частью ИП, видно значительное влияние экологического фактора (ущерба биоресурсам $C_{эк}$), по сравнению с совокупностью факторов, определяющих стоимость системы $C_{ст}$ и затрат на собственные энергетические нужды $C_{н}$. Так, например, ИП традиционной разомкнутой системы

для условий Баренцева моря равен 0,85, а значение $k_{\text{эк}} = 0,78$. Для Белого моря ИП = 0,1 и $k_{\text{эк}} = 0,02$, что однозначно указывает на важность учета экологического фактора при оценке того или иного варианта системы.

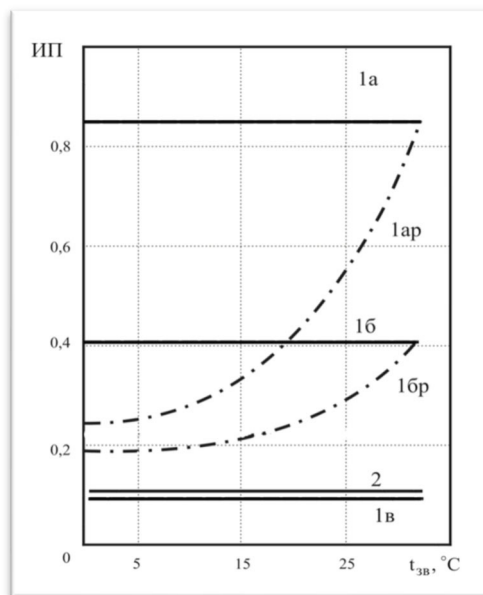


Рис. 7. Значения интегрального показателя ИП в зависимости от температуры морской воды $t_{\text{зв}}$ для различных морей и вариантов построения систем:

——— традиционная разомкнутая система; — система с перепуском или ЧРП
1а, 1б и 1в — традиционная система соответственно для Баренцева,

Черного и Белого морей; 2 — замкнутая система; 1ap и 1bp — системы с перепуском или частотно-регулируемым приводом, соответственно, для Баренцева и Черного морей

Fig. 7. Values of the Integral Performance Indicator ИП versus Seawater Temperature $t_{\text{зв}}$ for Different Seas and System Configurations:

solid line — conventional open-loop system; dashed line — system with bypass or variable-frequency drive;
1а, 1б, and 1в — conventional system for the Barents, Black, and White Seas, respectively;
2 — closed-loop system; 1ap and 1bp — systems with bypass or variable-frequency drive for the Barents and Black Seas, respectively.

На рис. 7 дополнительно представлены значения ИП для полностью замкнутой системы охлаждения, для которой значения $k_{\text{эк}} = 0$. Практически линии ИП для замкнутой системы (все моря) и разомкнутой системы для Белого моря совпали (на рисунке условно они несколько разведены). Также видно, что замкнутая система однозначно лучше разомкнутых систем с различными, описанными ранее, методами регулирования потребления заборной морской воды.

Замкнутая система с позиции сохранения биологических ресурсов морей является идеальной, однако ее использование имеет ограничения. Теплоотвод осуществляется в заборную морскую воду через судовую обшивку или другие выносные элементы¹⁷. Площадь таких поверхностей ограничена и для судов с высокой энерговооруженностью может оказаться недостаточной для обеспечения требуемого теплоотвода. Кроме того, внедрение таких систем, как правило, связано с соответствующими конструктивными решениями в отношении корпуса судна, что осуществимо только на этапе проектирования судна.

В таких условиях наиболее простым и эффективным средством минимизации отрицательного воздействия на биологические ресурсы морей следует считать использование систем с регу-

¹⁷ Федоровский, К. Ю. Теплопередача и теплообменные аппараты : учебник / К. Ю. Федоровский, Н. К. Гриценко. Москва : ИНФРА-М, 2025. 214 с. : ил. (Высшее образование). DOI 10.12737/2170972. ISBN 978-5-16-020382-9. Текст : электронный. — URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2170972> (дата обращения: 16.11.2025).

лируемой частой вращения насоса. Эти системы, по сравнению системами с перепуском, имеют существенно меньшие энергетические затраты, что отвечает исполнению указанных ранее требований конвенции МАРПОЛ 73/78. Кроме того, для существующих судов их разомкнутые системы охлаждения могут быть сравнительно просто соответствующим образом модернизированы.

Заключение (Conclusion)

Планируемое Российской Федерацией развитие СМП предусматривает существенный рост объема грузоперевозок, что связано с необходимостью увеличения количества судов, адаптированных для эксплуатации в таких условиях. Северные моря весьма чувствительны к антропогенному воздействию и требуют особых мероприятий по сохранению их экологических систем. Некоторые моря, например Баренцево, отличаются очень высокой рыбной продуктивностью, что актуализирует проблему снижения негативного воздействия систем охлаждения СЭУ на биологические ресурсы.

Исследования показали, что механизм такого негативного воздействия систем связан с уничтожением планктона, под воздействием механического и теплового факторов. В результате 70–90 %, а в некоторых случаях до 100 % попавшего в систему планктона погибает, что разрушает основу пищевой цепочки северных морей. С учетом низких температур воды в морях СМП, решение проблемы может быть обеспечено посредством минимизации потребления системами охлаждения СЭУ заборной морской воды или полного отказа от такого потребления.

Первое достигается за счет перепуска воды посредством терморегулирования или регулирования производительности насоса посредством ЧРП. Причем в последнем случае дополнительно снижаются энергозатраты, что является преимуществом. Полный отказ от приема заборной воды связан с применением замкнутых систем охлаждения, в отношении которых имеются положительные примеры реализации в практике отечественного судостроения. Каждый из рассмотренных подходов имеет свои обозначенные преимущества и недостатки при выборе варианта построения системы.

Проведенный с использованием ИП анализ полученных в результате исследования данных показал, что влияние экологического фактора является существенным и требует обязательного учета, при выборе того или иного варианта системы. Наилучшей является замкнутая система охлаждения, однако ее трудно реализовать для судов с высокой энерговооруженностью. В таких случаях наиболее целесообразно применение систем с регулируемой производительностью насоса, осуществляющего забор воды из акватории. Причем эффективность данного метода тем выше, чем меньше температура заборной воды. Например, по сравнению с традиционно используемыми разомкнутыми системами охлаждения, при снижении температуры морской воды до 5° С, наносимый ущерб биоресурсам Баренцева моря снижается примерно в 8 раз. Так же важно, что разомкнутые системы охлаждения уже существующих судов сравнительно просто могут быть переоборудованы с целью оснащения насосами с регулируемой производительностью.

Полученные результаты и рекомендации не ограничиваются судами и применимы для разнообразных морских платформ, создаваемых для освоения нефтяных и газовых месторождений Арктической зоны РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грициану Ж. С. Состояние мирового рыболовства и аквакультуры / Ж. С. Грициану. — ФАО, Рим, 2016. — 216 с.
2. Журавель В. П. Северный морской путь: оценки и прогнозы / В. П. Журавель // Научно-аналитический вестник Института Европы РАН. — 2023. — № 2(32). — С. 125–135. — EDN HYFJPB. — DOI: 10.15211/vestnikieran22023125135.
3. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 года с Протоколом 1978 года (МАРПОЛ 73/78). — Лондон: ИМО, 1973/1978. [Электронный ресурс]. — Режим доступа:

[https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx) (дата обращения 15.11.2025 г.).

4. Харламова А. Э. Анализ аварийности судов, вызванной ненадежной работой системы охлаждения судовых энергетических установок / А. Э. Харламова, М. Н. Покусаев, А. В. Трифонов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2023. — № 2. — С. 30–40. — EDN QCWWRO. — DOI: 10.24143/2073-1574-2023-2-30-40.

5. Шурпак В. К. Разработка руководства по обеспечению надежной работы систем охлаждения при плавании судов в условиях шуги / В. К. Шурпак // Транспортные системы. — 2025. — № 4(38). — С. 16–21. — EDN NRKXOU.

6. Тимофеев В. Н. Совершенствование системы охлаждения судового дизеля / В. Н. Тимофеев, Н. Ф. Тихонов // Тенденции развития науки и образования. — 2024. — № 106-9. — С. 233–236. — EDN FOIZTB. — DOI 10.18411/trnio-02-2024-535.

7. Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 31 марта 2020 года № 167 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным биологическим ресурсам» [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/564859759> (дата обращения: 16.11.2025 г.).

8. Котелевцев С. В. Эколого-биохимические аспекты развития планктонного сообщества: новый окат планктона в самоочищении воды / С. В. Котелевцев, С. А. Остроумов, А. П. Садчиков // Черноморский научный журнал академических исследований. — 2016. — Т. 29, № 3. — С. 55–61.

9. Звягинцев А. Ю. Предварительные материалы по оценке воздействия на окружающую среду эксплуатации энергоблока 2 и 3 Калининской АЭС на мощности реакторной установки 104 % от номинальной / А. Ю. Звягинцев, А. В. Мощенко. — Тверь, ООО «Гидротехпроект», 2013. — 333 с.

10. Звягинцев А. Ю. Морские техноэкосистемы энергетических станций / А. Ю. Звягинцев, А. В. Мощенко. — Владивосток: Дальнаука, 2010. — 343 с.

11. Martin R. Speight, Peter A. Henderson. *Marine Ecology: Concepts and Applications*. — Wiley-Blackwell, 2013. — 272 p.

REFERENCES

1. Gritsianu, Zh. S. *Sostoyanie mirovogo rybolovstva i akvakul'tury*. Rim: FAO, 2016: 216.
2. Zhuravel', V. P. "Northern sea route: estimates and forecasts." *Scientific and Analytical Herald of Ie Ras* 2(32) (2023): 125–135. DOI: 10.15211/vestnikieran2023125135.
3. IMO. "International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)." Web. November 15, 2025 <[https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)>.
4. Kharlamova, A. E., M. N. Pokusaev and A. V. Trifonov. "Analysis of ship accidents caused by unreliable operation of cooling systems of ship power plants." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2023): 30–40. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-2-30-40.
5. Shurpyak, V. K. "Razrabotka rukovodstva po obespecheniyu nadezhnoy raboty sistem okhlazhdeniya pri plavanii sudov v usloviyakh shugi ." *Transportnye sistemy* 4(38) (2025): 16–21.
6. Timofeev, V. N. and N. F. Tikhonov. "Sovershenstvovanie sistemy okhlazhdeniya sudovogo dizelya." *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* 106-9 (2024): 233–236. DOI: 10.18411/trnio-02-2024-535.
7. informatsii, Elektronnyy fond pravovoy i normativno-tekhnicheskoy. "Ob utverzhdenii Metodiki ischisleniya razmera vreda, prichinnogo vodnym biologicheskim resursam ot 31 marta 2020." Web. November 16, 2025 <<https://docs.cntd.ru/document/564859759>>.
8. Kotelevtsev, S. V., S. A. Ostroumov and A. P. Sadchikov. "Ekologo-biokhimicheskie aspekty funktsionirovaniya planktonnogo soobshchestva: novoe o roli planktona v samoochishenii vody." *Black Sea Scientific Journal of Academic Research* 29.3 (2016): 55–61.
9. Zvyagintsev, A. Yu. and A. V. Moschenko. *Predvaritel'nye materialy po otsenke vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredyu ekspluatatsii energobloka 2 i 3 Kalininskoy AES na moschnosti reaktornoy ustanovki 104 % ot nominal'noy*. Tver': ООО "Gidrotekhproekt", 2013: 333.
10. Zvyagintsev, A. Yu. et al. *Morskie tekhnookosistemy energeticheskikh stantsiy*. Vladivostok : Dal'nauka, 2010: 343.
11. Speight, M. R. and P. A. Henderson. *Marine Ecology: Concepts and Applications*. Wiley-Blackwell, 2013: 272.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федоровский Константин Юрьевич —

д-р техн. наук, проф.

Севастопольский государственный университет

299053, Российская Федерация, г. Севастополь,

ул. Университетская, 33

e-mail: fedkonst@rambler.ru

Широких Надежда Константиновна —

канд. техн. наук, доц.

Севастопольский государственный университет

299053, Российская Федерация, г. Севастополь,

ул. Университетская, 33

e-mail: n.fedorovskaya14@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedorovskiy, Konstantin Yu. —

Doctor of Technical Sciences, Professor

Sevastopol State University

33 Universitetskaya St., Sevastopol,

299053, Russian Federation

e-mail: fedkonst@rambler.ru

Shirokikh, Nadezhda K. —

Candidate of Technical Sciences, Associate professor

Sevastopol State University

33 Universitetskaya St., Sevastopol,

299053, Russian Federation

e-mail: n.fedorovskaya14@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 января 2026 г.

Received: Jan 29, 2026.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-744-754

EDN EBMECI

УДК:681.516.312:007.5

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «СУДОВОДИТЕЛЬ – ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА» С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМ ФАКТОРОМ

А. В. Макаrchук, Н. В. Макаrchук, Н. К. Голубов

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования является разработка динамической математической модели надежности эргатической системы «судоводитель – информационная система» и алгоритма адаптивной перенастройки человеко-машинного интерфейса. Рассмотрены существующие подходы к учету человеческого фактора в судовождении, включая модели экспоненциального снижения бдительности, двухуровневые структуры эргатических систем и статические шкалы оценки сложности навигационной обстановки. Установлено, что комплексная модель, интегрирующая эти факторы с адаптивным интерфейсом, в настоящее время отсутствует. В результате формализован коэффициент бдительности судоводителя с введением множителя когнитивной нагрузки, предложена вероятностная оценка ошибок оператора в зависимости от навигационной ситуации, разработан алгоритм адаптивного управления, снижающий прирост ошибочных действий за время вахты. Цель исследования заключается в разработке математической динамической модели надежности указанной эргатической системы и алгоритма адаптивной перенастройки человеко-машинного интерфейса. Для достижения цели решены следующие задачи: формализован коэффициент бдительности судоводителя с введением множителя когнитивной нагрузки; предложена вероятностная оценка ошибок оператора в зависимости от сложности навигационной ситуации; разработан алгоритм адаптивного управления, снижающий прирост ошибочных действий за время вахты; проведено имитационное моделирование с использованием метода Монте-Карло для трех типовых сценариев судовождения. Научная новизна состоит в создании динамической модели с обратной связью, обеспечивающей адаптацию интерфейса к текущему состоянию оператора. Практическая значимость результатов заключается в возможности применения разработанной модели при проектировании систем поддержки принятия решений на судовом мостике и в тренажерной подготовке судоводителей.

Ключевые слова: эргатическая система, человеческий фактор, судовождение, коэффициент бдительности, адаптивный интерфейс, имитационное моделирование, ходовая вахта, когнитивная нагрузка, надежность, CNS.

Для цитирования:

Макаrchук, А. В. Динамическая модель оценки надежности эргатической системы «судоводитель – информационная система» с адаптивным управлением человеческим фактором / А. В. Макаrchук, Н. В. Макаrchук, Н. К. Голубов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 4. С. 744–754. EDN EBMECI. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-744-754.

DYNAMIC MODEL FOR RELIABILITY ASSESSMENT OF THE ERGATIC SYSTEM “NAVIGATOR–INFORMATION SYSTEM” WITH ADAPTIVE HUMAN-FACTOR CONTROL

A. V. Makarchuk, N. V. Makarchuk, N. K. Golubov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

The subject of the study is the development of a dynamic mathematical model of the reliability of the ergatic system “navigator–information system” and an algorithm for adaptive reconfiguration of the human–machine interface. Existing approaches to accounting for the human factor in ship navigation are considered, including models of exponential decline in vigilance, two-level structures of ergatic systems, and static scales for assessing the complexity of the navigational situation. It has been established that a comprehensive model integrating these factors with an adaptive interface is currently lacking. As a result, the navigator’s vigilance coefficient has been formalized by introducing a cognitive-load multiplier; a probabilistic assessment of operator errors depending on the navigational situation has been proposed; and an adaptive control algorithm has been developed that reduces the increase in erroneous actions during a watch. The aim of the study is to develop a dynamic mathematical model of the reliability of the specified ergatic system and an algorithm for adaptive reconfiguration of the human–machine interface. To achieve this aim, the following tasks have been accomplished: the navigator’s vigilance coefficient has been formalized by introducing a cognitive-load multiplier; a probabilistic assessment of operator errors depending on the complexity of the navigational situation has been proposed; an adaptive control algorithm has been developed that reduces the increase in erroneous actions during a watch; and simulation modeling using the Monte Carlo method has been carried out for three typical ship-navigation scenarios. The scientific novelty lies in the development of a dynamic model with feedback that ensures adaptation of the interface to the operator’s current state. The practical significance of the results lies in the possibility of applying the developed model in the design of decision support systems on the ship’s bridge and in simulator training for navigators.

Keywords: ergatic system, human factor, ship navigation, vigilance coefficient, adaptive interface, simulation modeling, navigational watch, cognitive load, reliability, CNS.

For citation:

Makarchuk, Alexandra V., N. V. Makarchuk and N. K. Golubov. “Dynamic model for reliability assessment of the ergatic system “navigator–information system” with adaptive human-factor control” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.4 (2026): 744–754. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-744-754.

Введение (Introduction)

По данным Международной морской организации (ИМО), до 80 % морских аварий и инцидентов связаны с человеческим фактором [1]. При этом в условиях развития безэкипажного судостроительства и цифровизации навигационных систем проблема интеграции человека в контур управления приобретает новое измерение: судоводитель все чаще выступает не как непосредственный исполнитель, а как оператор, наблюдающий за автоматикой и вмешивающийся в критических ситуациях [2]. Согласно классификации Российского морского регистра судостроительства, выделено несколько уровней автоматизации: от судна с автоматизированным управлением и присутствием экипажа до полностью автономного (безэкипажного) судна. На всех этих уровнях сохраняется необходимость учета человеческого фактора, однако роль оператора трансформируется, что требует новых подходов к оценке надежности эргатической системы.

Актуальность исследования определяется сохраняющимся высоким уровнем аварийности, связанным с человеческим фактором, а также тем, что существующие подходы [1–3] не позволяют в полной мере количественно оценить надежность эргатической системы «судоводитель – информационная система» с учетом динамики психофизиологического состояния оператора. Имеющиеся подходы [1–3] либо рассматривают человеческий фактор изолированно, либо используют статические коэффициенты, не учитывающие временную динамику бдительности и когнитивной нагрузки, что требует совершенствования.

Современные исследования в области эргатических систем судовождения [4] подчеркивают необходимость формализованного учета человеческого фактора как неотъемлемого элемента системы управления, функционирование которого регламентируется стандартами компетенции Международной конвенции ПДНВ-78. В работе [5] установлено, что «невыполнение моряком предписанных ему обязанностей является нарушением назначенной ему функции — дисфункцией», что позволяет количественно оценивать вклад человеческого фактора в аварийность.

Анализ существующих подходов показывает, что модель [1] описывает динамику бдительности через произведение экспоненциального спада и суточных ритмов, не учитывая при этом когнитивную нагрузку. Модель [2] формализует двухуровневую структуру эргатической системы,

предполагая при этом неизменную эффективность оператора. Шкала *CNS* [3] позволяет количественно оценить сложность навигационной ситуации, но она статична и не связана с динамикой состояния оператора.

Целью исследования является разработка динамической математической модели оценки надежности эргатической системы «судоводитель – информационная система» и алгоритма адаптивного управления человеческим фактором на основе интеграции существующих подходов [1–3] с введением контура обратной связи по состоянию оператора.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Согласно Международной конвенции ПДНВ-78/95 (Правило VIII/1), максимальная продолжительность непрерывной ходовой навигационной вахты составляет 4 часа. В настоящем исследовании моделируется именно 4-часовая ходовая вахта как наиболее релевантный сценарий для оценки утомляемости судоводителя.

Предлагаемая модель базируется на двухуровневой иерархии, предложенной в [2], дополняя ее контуром обратной связи по состоянию оператора. Эргатическая система представляется в виде

$$S = \{S_{tech}, S_{human}, I_{adapt}\}, \quad (1)$$

где S_{tech} — техническая подсистема (навигационное оборудование, ЭКНИС, САРП);

S_{human} — подсистема «судоводитель»;

I_{adapt} — адаптивный интерфейс, изменяющий параметры отображения информации.

Динамическая математическая модель эргатической системы «судоводитель – информационная система» представляет собой систему уравнений, описывающих изменение во времени ключевых показателей надежности и эффективности системы с учетом динамики психофизиологического состояния оператора (утомляемость, суточные ритмы), когнитивной нагрузки, зависящей от сложности навигационной ситуации, технической надежности оборудования и адаптивной перенастройки интерфейса.

Модель состоит из трех основных уравнений.

Первое уравнение модели — коэффициент бдительности судоводителя $k(t, \tau, CNS)$ — описывает динамику внимания и готовности оператора к выполнению своих функций в зависимости от времени вахты t , времени бездействия τ и сложности навигационной ситуации CNS :

$$k(t, \tau, CNS) = \max \left(0, \min \left(1, \frac{K_0}{1+A} \left[1 + A \cdot \sin \left(\frac{2\pi t}{24} + \frac{\pi}{2} \right) \right] \cdot e^{-\lambda \tau} \cdot \gamma(\tau, CNS) \right) \right), \quad (2)$$

где $K_0 = 0,98$ — начальный коэффициент бдительности (в начале вахты);

A — амплитуда суточных колебаний [1];

$\lambda = 0,025$ 1/ч — скорость убывания бдительности (значение принято авторами в качестве рабочей гипотезы, обеспечивающей снижение экспоненциального множителя $e^{-\lambda \tau}$ с 1 до $\approx 0,905$ за четыре часа вахты, что соответствует уменьшению коэффициента бдительности примерно на 9,5 % (уточнение параметра требует экспериментальной калибровки по данным тренажерных или натурных наблюдений);

t — время вахты, ч;

$\gamma(\tau, CNS)$ — множитель когнитивной нагрузки;

τ — время с момента последнего активного действия оператора, с;

CNS — коэффициент сложности навигационной ситуации (0–1) по методике [3].

Коэффициент бдительности нормирован и принимает значения в интервале от 0 до 1, где 1 соответствует максимальной бдительности (полностью отдохнувший оператор в начале вахты), 0 — полной утрате бдительности. Нормировка обеспечивается функциями внешнего ограничения $\max(0, \min(1 \dots))$ в формуле (2).

Динамический характер уравнения обусловлен изменением коэффициента бдительности под влиянием двух факторов: длительности непрерывной работы (экспоненциальное убывание и суточные циркадные колебания) и времени бездействия оператора (накопление когнитивной нагрузки).

Амплитуда суточных колебаний рассчитывается по формуле из [1]:

$$A = \frac{1 - \sqrt{2} - K_0 + \sqrt{2}K_0}{\sqrt{2} - 1 - K_0 - \sqrt{2}K_0}. \quad (3)$$

Для $K_0 = 0,98$ получим $A \approx 0,00425$.

Второе уравнение модели — множитель когнитивной нагрузки $\gamma(\tau, CNS)$ — учитывает влияние сложности навигационной ситуации и времени без активных действий оператора:

$$\gamma(\tau, CNS) = \max \left(\gamma_{\min}, 1 - CNS \cdot \min \left(\frac{\tau}{\tau_{\max}}, 1 \right) \right), \quad (4)$$

где $\tau_{\max} = 300$ с — пороговое время (принято на основе данных [3, 6] о временных характеристиках устойчивости внимания);

$\gamma_{\min} = 0,1$ — минимальное значение множителя когнитивной нагрузки.

Динамический характер этого уравнения проявляется в монотонном снижении множителя когнитивной нагрузки по мере увеличения времени бездействия оператора: чем дольше оператор не совершает активных действий, тем сильнее снижается его бдительность. Функция $\min \left(\frac{\tau}{\tau_{\max}}, 1 \right)$ предотвращает неограниченное уменьшение $\gamma(\tau, CNS)$ при $\tau < \tau_{\max}$, а нижняя граница $\gamma_{\min} = 0,1$ обеспечивает сохранение минимального уровня бдительности даже при максимальной когнитивной нагрузке.

Третье уравнение модели — вероятность ошибочного действия судоводителя $P_{err}(t, CNS)$ — связывает коэффициент бдительности и сложность навигационной ситуации с риском ошибочных действий:

$$P_{err}(t, CNS) = \min \left(1, \max \left(P_{base}, P_{base} \cdot \left[1 + \left(1 + \frac{CNS}{0,1} \right) \cdot (1 - k(t)) \right] \right) \right), \quad (5)$$

где $P_{base} = 0,05$ — базовая вероятность ошибки;

$\frac{CNS}{0,1} = 10CNS$ — коэффициент, обеспечивающий приведение шкалы CNS к десятибалльной [3].

Динамический характер уравнения (5) проявляется в росте вероятности ошибки при снижении коэффициента бдительности в течении вахты. Чем больше утомление оператора, тем выше риск ошибочных действий.

Интегральная надежность эргатической системы определяется как произведение надежности технической подсистемы и вероятности безошибочной работы оператора:

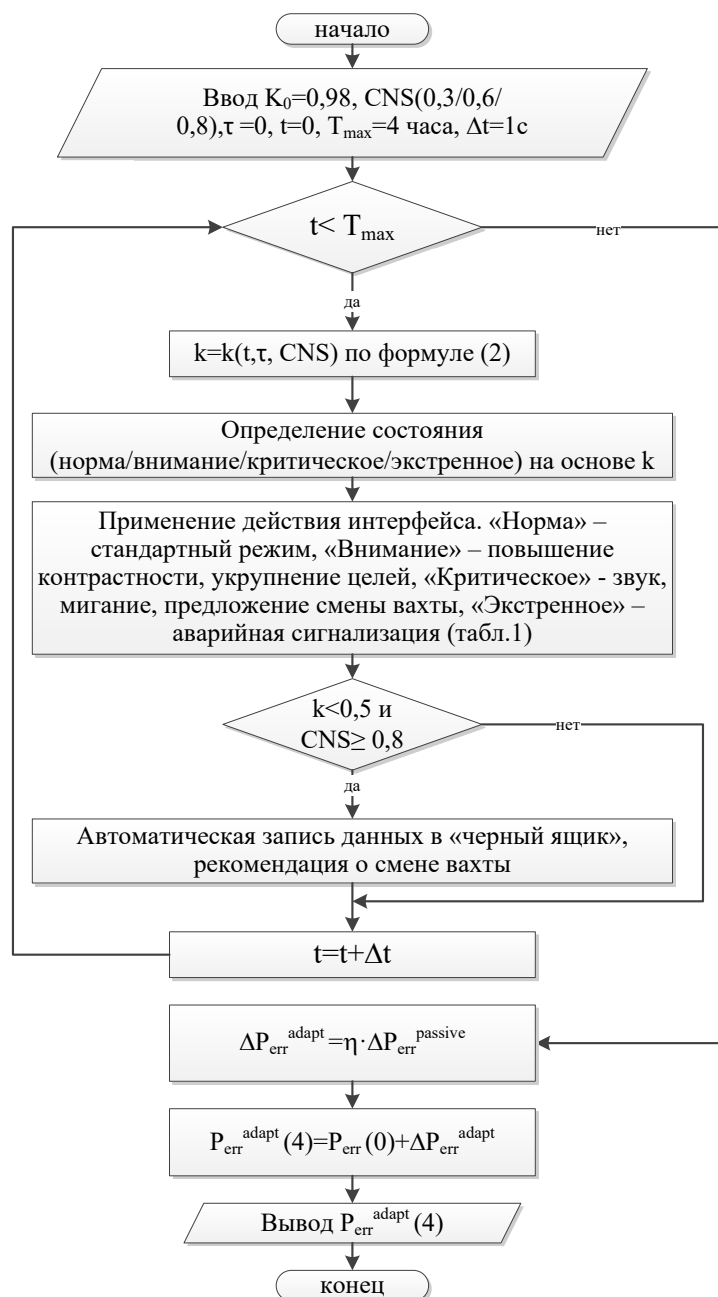
$$P_{\Sigma}(t, CNS) = P_{tech}(t) \cdot (1 - P_{err}(t, CNS)). \quad (6)$$

Надежность технической подсистемы $P_{tech}(t) = e^{-\lambda_{tech}t}$ с параметром $\lambda_{tech} = 10^{-4}$ 1/ч. При $t = 4$ ч:

$P_{tech}(4) \approx 0,9996$, что соответствует высокой надежности современного навигационного оборудования.

Математическая суть модели заключается в том, что она представляет эргатическую систему как совокупность связанных уравнений, учитывая несколько временных масштабов (часы — для утомления, секунды — для когнитивной нагрузки); включает нелинейные ограничения, обеспечивая обратную связь через адаптивную коррекцию прироста ошибки.

Алгоритм адаптивной перенастройки интерфейса предназначен для динамической перенастройки параметров человеко-машинного интерфейса в реальном времени на основе текущего значения коэффициента бдительности $k(t, \tau, CNS)$. Данный коэффициент учитывает сложность навигационной ситуации CNS через множитель когнитивной нагрузки $\gamma(\tau, CNS)$ на следующей схеме:



Алгоритм адаптивной перенастройки интерфейса
Adaptive Interface Reconfiguration Algorithm

Логика работы алгоритма основана на определении текущего состояния системы по значению коэффициента бдительности. В зависимости от этого состояния интерфейс переключает режим отображения информации (табл. 1).

Таблица 1

Состояние системы и соответствующие действия интерфейса

Table 1

System States and Corresponding Interface Actions

Состояние системы	Условие	Действие интерфейса
Норма	$k \geq 0,9$	Стандартный режим отображения
Внимание	$0,7 \leq k < 0,9$	Повышение контрастности, укрупнение критических символов
Критическое	$k < 0,7$	Звуковая активация, мигание опасных целей, предложение смены вахты
Экстренное	$k < 0,5$ и $CNS \geq 0,8$	Аварийная сигнализация, автоматическая запись данных

Приведенная блок-схема описывает логику работы адаптивного интерфейса в реальном времени. Однако для оценки эффективности адаптации недостаточно знать, в каком состоянии находится интерфейс в каждый момент времени. Важно понять, насколько адаптация снижает риск ошибочных действий судоводителя в целом за всю вахту. Именно для этого в алгоритм введен параметр η , который показывает, какую долю прироста ошибки, вызванного утомлением, удается компенсировать. $\Delta P_{err}^{passive} = P_{err}(4) - P_{err}(0)$ — прирост ошибки в пассивном сценарии (без адаптации) за 4 часа вахты, $\eta = 0,7$ — коэффициент эффективности адаптации. Значение $\eta = 0,7$ выбрано на основе данных работы [7], в которой показано, что адаптивные интерфейсы позволяют снизить когнитивную нагрузку оператора на 20–40 %. Принятое значение соответствует снижению прироста на 30 %. Уточнение коэффициента требует проведения натурных экспериментов на навигационных тренажерах. Сравнение пассивного и адаптивного сценариев позволяет получить численную меру эффективности предложенного подхода.

Моделирование выполнено в среде MATLAB / Simulink методом Монте-Карло ($N = 1000$ прогонов для каждого сценария). Рассмотрены три сценария в соответствии со шкалой CNS [3] (табл. 2). Длительность каждого сценария — 4 часа (нормативная продолжительность ходовой вахты).

Таблица 2

Сценарии имитационного моделирования

Table 2

Simulation Scenarios

Сценарий	CNS	Ранг сложности [3]	Характеристика
1. Открытое море	0,3	3 (легкие условия)	Низкая интенсивность движения
2. Узкость	0,6	6 (умеренные условия)	Ограниченная акватория
3. Подход к порту	0,8	8 (тяжелые условия)	Максимальная сложность

Экспоненциальное падение бдительности и суточные ритмы смоделированы с использованием стандартных блоков Exponential и Sine Wave. Алгоритм адаптивной перенастройки интерфейса на блоках Switch и Matlab Function.

Результаты (Results)

Расчеты показали результаты, приведенные в табл. 3–5.

Таблица 3

Динамика изменения коэффициента бдительности $k(t)$ для трех сценариев

Table 3

Dynamics of the Vigilance Coefficient $k(t)$ for Three Scenarios

Сценарий	$k(0)$	$k(4)$	Снижение за вахту
Открытое море ($CNS = 0,3$)	0,980	0,895	8,7 %
Узкость ($CNS = 0,6$)	0,980	0,845	13,8 %
Подход к порту ($CNS = 0,8$)	0,980	0,810	17,2 %

Таблица 4

Вероятность ошибки судоводителя при пассивном сценарии (без адаптивного интерфейса)

Table 4

Probability of Navigator Error in the Passive Scenario (without an Adaptive Interface)

Сценарий	$P_{err}(0)$	$P_{err}(4)$	Прирост
Открытое море ($CNS = 0,3$)	0,0540	0,0710	0,0170
Узкость ($CNS = 0,6$)	0,0574	0,1043	0,0469
Подход к порту ($CNS = 0,8$)	0,0599	0,1355	0,0756

Примечание. Применение адаптивного интерфейса снижает прирост ошибки на 30% ($\eta = 0,7$).

Таблица 5

Эффективность адаптивного интерфейса

Table 5

Effectiveness of the Adaptive Interface

Сценарий	$P_{err}^{adapt}(4)$	Снижение P_{err}	95 %LB	p-значение
Открытое море ($CNS = 0,3$)	0,0659	7,2 %	[6,2 %; 8,2 %]	< 0,01
Узкость ($CNS = 0,6$)	0,0902	13,5 %	[12,3 %; 14,7 %]	< 0,001
Подход к порту ($CNS = 0,8$)	0,1128	16,8 %	[15,5 %; 18,1 %]	< 0,001

Различия между пассивным и адаптивным сценариями статистически значимы для всех сценариев (критерий Стьюдента для связанных выборок, $N = 1\,000$). Сравнительный анализ по основным параметрам предлагаемой и известных моделей выполнен в табл. 6.

Таблица 6

Сравнительный анализ

Table 6

Comparative Analysis

Параметр	[1]	[2]	[3]	Предлагаемая модель
Учет динамики бдительности	+	–	–	+
Учет суточных ритмов с нормировкой	+	–	–	+
Учет когнитивной нагрузки	–	–	–	+
Использование шкалы CNS [3]	–	–	+	+
Учет 4-часового лимита вахты	–	–	–	+
Адаптивное управление интерфейсом	–	–	–	+
Обратная связь по состоянию оператора	–	–	–	+

Обобщающие результаты исследования:

1. Разработана динамическая математическая модель коэффициента бдительности судоводителя, интегрирующая оригинальную модель [1] с множителем когнитивной нагрузки, зависящим от коэффициента сложности CNS [3] и времени бездействия оператора. Модель включает явные ограничения диапазонов ($k \in [0,1]$ и $\gamma(\tau) \geq 0,1$), обеспечивающие физическую осмысленность.

2. Предложен алгоритм адаптивной перенастройки интерфейса, реализующий контур обратной связи по состоянию оператора в двухуровневой структуре эргатической системы [2].

3. Имитационное моделирование (метод Монте-Карло, $N = 1\,000$) показало, что предложенный алгоритм обеспечивает статистически значимое снижение вероятности ошибки судоводителя на 13,5–16,8 % для навигационных ситуаций высокого ранга сложности ($CNS \geq 0,6$, ранги 6–8 по шкале [3]) при нормативной 4-часовой продолжительности ходовой вахты.

4. Вычислительные эксперименты на трех типовых сценариях («открытое море», «узкость», «подход к порту») подтвердили ее работоспособность и эффективность. Наибольший эффект достигается в тяжелых навигационных условиях ($CNS = 0,8$), где адаптация снижает вероятность ошибки с 0,1355 до 0,1128.

Разработанная модель может служить теоретической основой для создания адаптивных систем поддержки принятия решений на судовом мостике, учитывающих текущее психофизиологическое состояние оператора [8], реальную продолжительность вахты и объективную сложность навигационной обстановки по шкале CNS [3].

Обсуждение (Discussion)

Коэффициент бдительности обозначен как k , подразумевая его зависимость от времени вахты, времени бездействия оператора и сложности навигационной ситуации CNS .

Научная новизна исследования заключается в получении трех основных результатов.

1. Разработана динамическая математическая модель эргатической системы, включающая систему из трех уравнений: коэффициент бдительности k , множитель когнитивной нагрузки и вероятность ошибки. Модель отличается от оригинального подхода [1] введением множителя когнитивной $\gamma(\tau, CNS)$, зависящего от коэффициента сложности навигационной ситуации CNS [3] и времени с момента последнего активного действия оператора. Введены явные ограничения диапазонов $k \in [0,1]$ и $\gamma(\tau) \geq 0,1$, обеспечивающие физическую осмысленность модели, и рабочая гипотеза параметра утомления $\lambda = 0,025$ 1/ч.

2. Впервые в двухуровневую иерархическую структуру эргатической системы [2] встроен контур обратной связи, реализующий адаптивную перенастройку человеко-машинного интерфейса в реальном времени на основе текущего коэффициента бдительности k . Это устраняет ключевое ограничение существующих подходов, предполагающих неизменную эффективность оператора независимо от его состояния.

3. Вычислительные эксперименты показали, что предложенный алгоритм обеспечивает статистически значимое снижение вероятности ошибки судоводителя ($p < 0,001$) на 13,5–16,8 % для навигационных ситуаций высокого ранга сложности ($CNS \geq 0,6$, ранги 6 – 8 по шкале [3]) при нормативной 4-часовой продолжительности ходовой вахты. Наибольший эффект достигнут для сценария «подход к порту» ($CNS = 0,8$), где снижение составило 16,8 %.

Практическая значимость заключается в следующем: предложенная модель может служить теоретической основой для дальнейших исследований, направленных на создание прототипов адаптивных интерфейсов. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании систем поддержки принятия решений (СППР) на судовом мостике с учетом динамики человеческого фактора, оригинальной модели бдительности [1] и реальной шкалы CNS [3]; в процессе тренажерной подготовки судоводителей для объективной оценки надежности курсантов в различных навигационных сценариях [9]; при разработке требований к эргономике интерфейсов ЭКНИС и САРП [10]; для обоснования дополнительных мер поддержки судоводителя в последний час 4-часовой вахты, когда утомление достигает максимума.

Ограничения модели:

1. В настоящем исследовании выполнена только вычислительная верификация модели. Валидация на реальных данных судовождения или натурных экспериментах с участием судоводителей не проводилась. Результаты следует рассматривать как подтверждение работоспособности предложенного подхода в рамках принятых допущений.

2. Параметр $\lambda = 0,025$ 1/ч принят в качестве рабочей гипотезы и требует эмпирической калибровки по данным тренажерных или натурных наблюдений. Параметры K_0 , A , P_{base} , τ_{max} и η также требуют уточнения под конкретные типы судов, маршруты и индивидуальные особенности судоводителей.

3. Модель не учитывает индивидуальные различия (возраст, профессиональный опыт, хронотип).

4. Имитационное моделирование не заменяет натурных испытаний на судовом тренажере.

5. Коэффициент эффективности адаптации $\eta = 0,7$ принят в качестве рабочей гипотезы на основе данных [7] и требует уточнения в натурных экспериментах.

Направления дальнейших исследований:

– интеграция модели с реальными данными сенсоров (eye-tracking, ЭЭГ, пульсометрия) для персонализации параметров под конкретного оператора;

– проведение валидации модели на реальных данных, полученных в ходе тренажерной подготовки судоводителей, с последующим сопоставлением расчетных значений вероятности ошибки с фактическими действиями операторов;

– уточнение параметра τ_{max} экспериментальными методами для различных навигационных сценариев;

– адаптация модели для учета смены вахт и кумулятивного эффекта утомления за несколько последовательных вахт, калибровка параметра λ по данным реальных наблюдений за бдительностью судоводителей в различных условиях плавания.

Заключение(Conclusion)

Актуальность работы, связанная с высоким уровнем аварийности на морском транспорте и недостаточной разработанностью динамических моделей эргатических систем, подтверждена полученными результатами. Разработанная модель позволяет количественно оценивать надежность системы «судоводитель – информационная система» в реальном времени с учетом утомления, суточных ритмов и когнитивной нагрузки.

В отличие от существующих статических подходов, предложенная модель содержит встроенный контур обратной связи по состоянию оператора и обеспечивает адаптацию интерфейса к текущему уровню бдительности.

Решение поставленных задач подтверждено следующими результатами:

– коэффициент бдительности формализован с введением множителя когнитивной нагрузки, зависящего от сложности навигационной ситуации CNS и времени бездействия оператора;

– разработана вероятностная оценка ошибок судоводителя, учитывающая изменение бдительности в течение вахты;

– разработан алгоритм адаптивного управления, в котором коэффициент эффективности адаптации принят равным $\eta = 0,7$ (снижение прироста ошибки на 30% — рабочая гипотеза, требующая экспериментального уточнения);

– имитационное моделирование методом Монте-Карло ($N = 1000$) для сценариев «открытое море» ($CNS = 0,3$), «узкость» ($CNS = 0,6$) и «подход к порту» ($CNS = 0,8$) при 4-часовой вахте показало статистически значимое снижение вероятности ошибки (7,2–16,8%, $p < 0,01$ –0,001).

Научная новизна работы реализована в трех аспектах: разработана динамическая модель с обратной связью; впервые в двухуровневую структуру эргатической системы встроен адаптивный контур; предложенный алгоритм при проведении вычислительных экспериментов показал снижение вероятности ошибки в тяжелых навигационных условиях на 13,5–16,8%.

Практическая значимость заключается в создании теоретической и алгоритмической основы, которая после соответствующей валидации может быть адаптирована для реальных условий эксплуатации. Полученные результаты создают базу для дальнейших исследований, направленных на внедрение адаптивных интерфейсов в практику судовождения и в тренажерную подготовку судоводителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бураковский Е. П. Изучение структуры коэффициента, учитывающего человеческий фактор при навигационных авариях / Е. П. Бураковский, П. Е. Бураковский // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 439–447. — EDN YVBGPJ. — DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-439-447.
2. Холичев С. Н. Исследование структуры деятельности судового специалиста в эргатической системе при контроле и управлении процессом автоматического регулирования параметров состояния безопасного плавания / С. Н. Холичев, В. И. Меньшиков, К. В. Пенъковская // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. — 2016. — Т. 19. — № 4. — С. 798–805. — EDN XHMTWTB. — DOI: 10.21443/1560-9278-2016-4-798-805.
3. Ермаков С. В. Превентивное регулирование человеческого фактора в морском судовождении / С. В. Ермаков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5(39). — С. 39–50. — EDN WVOQDD. — DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-39-50.
4. Фадюшин С. Г. Концептуальная схема интеллектуальной системы управления движением судна с учетом человеческого фактора / С. Г. Фадюшин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15 (№ 2). — С. 180–190. — EDN KMOERL. — DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-180-190.
5. Попов В. В. Эргатическая система НУИК АПК АРМ в интегрировании искусственного интеллекта в систему управления судном / В. В. Попов // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. — 2025. — № 1(116). — С. 13–17. — EDN KPRJRC.
6. Ботнарюк М. В. Меры сохранения психического здоровья моряков при работе на автономных надводных судах / М. В. Ботнарюк, Т. Н. Тимченко // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. — 2024. — Т. 32 (№ S1). — С. 548–554. — EDN ADGGIS. — DOI 10.32687/0869-866X-2024-32-s1-548-554.
7. Wickens C. D., Ververs P. M. Allocation of attention with head-up displays: final report/- Washington? D.C. : Federal Aviation Administration, Office of Aviation Medicine, 1998/-15p-(DOT/FAA/AM-98/28).
8. Хекерт Е. В. Влияние человеческого фактора на безопасность в линейном судоходстве: обоснование системного мониторинга психофизиологического состояния экипажа / Е. В. Хекерт, Т. В. Головань // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. — 2025. — Т. 33 (№ 5). — С. 1247–1255. — EDN XEDMZR. — DOI: 10.32687/0869-866X-2025-33-5-1247-1255.
9. Чекалин В. В. Эргатический подход к проектированию обучающей среды в системе профессиональной подготовки судоводителей / В. В. Чекалин // Педагогика. Вопросы теории и практики. — 2025. — Т. 10 (№ 9). — С. 1336–1344. — EDN ARDYDA. — DOI 10.30853/ped20250160.
10. Christine Chauvin, Salim Lardjane, Decision making and strategies in an interaction situation: Collision avoidance at sea // Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour. — 2008. — Vol. 11(4). — Pp. 259–269. — DOI: 10.1016/j.trf.2008.01.001.

REFERENCES

1. Burakovskiy, E. P. and P. E. Burakovskiy. “Study of the structure of coefficient taking account the human factor under the navigation accidents.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 11.3 (2019): 439–447. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-439-447.
2. Kholichev, S. N., V. I. Men'shikov and K. V. Pen'kovskaya. “Study of structure of marine specialist activity in an ergative system on monitoring and managing automatic control parameters of safe navigation process.” *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 19.4 (2016): 798–805. DOI: 10.21443/1560-9278-2016-4-798-805.

3. Ermakov, S. V. "Preventive regulation of the human factor in marine navigation." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(39) (2016): 39–50. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-39-50.
4. Fadyushin, S. G. "Conceptual scheme of intelligent vessel traffic control system with the human factor included." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 15.2 (2023): 180–190. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-180-190.
5. Popov, V. V. "Ergotic system of nuik apc arm in the integration of artificial intelligence into ship management systems." *Transport of The Russian Federation* 1(116) (2025): 13–17.
6. Botnaryuk, M. V. and T. N. Timchenko. "Measures to preserve the mental health of sailors when working on autonomous surface vessels." *Problems of Social Hygiene, Public Health and History of Medicine* 32 (2024).
7. Wickens, C. D., and P. M. Ververs. *Allocation of Attention with Head-Up Displays: Final Report*. Washington, D.C.: Federal Aviation Administration, Office of Aviation Medicine, 1998. DOT/FAA/AM-98/28.
8. Khekert, E. V. and T. V. Golovan'. "The impact of human factor on security in line shipping: substantiation of system monitoring of psycho-physiological condition of crew." *Problems of Social Hygiene, Public Health and History of Medicine* 33.5 (2025): 1247–1255. DOI: 10.32687/0869-866X-2025-33-5-1247-1255.
9. Chekalin, V. V. "An ergatic approach to the design of a learning environment in the professional training of ship navigators." *Pedagogy. Theory & Practice* 10.9 (2025): 1336–1344. DOI: 10.30853/ped20250160.
10. Chauvin, C. and S. Lardjane. "Decision making and strategies in an interaction situation: Collision avoidance at sea." *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 11.4 (2008): 259–269. DOI: 10.1016/j.trf.2008.01.001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Макарчук Александра Васильевна —
кандидат технических наук
Государственный университет морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: anvm1525@mail.ru

Макарчук Наталия Васильевна —
кандидат технических наук
Государственный университет морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: mnv_guap@mail.ru

Голубов Никита Константинович — аспирант
Государственный университет морского и речного
флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gnkspb@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Makarchuk Alexandra V. —
Candidate of Technical Sciences
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7, Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: anvm1525@mail.ru

Makarchuk Natalia V. —
Candidate of Technical Sciences
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7, Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: mnv_guap@mail.ru

Golubov Nikita K. — Postgraduate Student
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7, Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: gnkspb@bk.ru

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2026 г.
Received: Apr. 29, 2026.

INTELLIGENT FUZZY LOGIC-BASED DECISION SUPPORT SYSTEM FOR MARINE MAIN DIESEL ENGINES

N. A. Polkovnikova, A. K. Polkovnikov

Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

The subject of the study is the development of an intelligent decision support system based on fuzzy logic for marine diesel engines, aimed at improving diagnostic accuracy and operational reliability under conditions of incomplete, uncertain, or fragmented data. The relevance of the study is determined by the increasing complexity of parameters monitored by shipboard automation systems and the stringent requirements for safe and efficient engine operation, which create significant difficulties for shipboard specialists in real-time information analysis. The study examines the application of fuzzy logic, production rules, intelligent data analysis methods, and expert knowledge bases to assess the technical condition of marine diesel engines, detect faults at the individual-cylinder level, determine permissible operating modes with due regard to technical and navigational conditions, predict gradually developing faults, and prioritize maintenance activities. The architecture of an intelligent decision support system is developed to provide a transition from conventional monitoring to intelligent information-oriented control in human-machine systems. A fault and troubleshooting database and a knowledge base formalizing production rules using the concept of deviations are considered. A fuzzy inference procedure is implemented, including fuzzification of input parameters obtained from engine monitoring systems, processing using the Mamdani-Zadeh method, and defuzzification of the results to obtain real-time assessments of engine condition. The system provides a graphical interface displaying parameter deviations, probable faults, and operational recommendations. The results show that the proposed approach effectively approximates expert reasoning, accounts for nonlinearities and uncertainties, and provides a basis for improving the efficiency of predictive maintenance, optimizing operating modes, and improving the overall operating efficiency of marine diesel engines.

Keywords: decision support system, knowledge base, predictive maintenance, marine diesel engine, adaptive nneuro-fuzzy system, linguistic variable, membership function.

For citation:

Polkovnikova, Natalia A. and A. K. Polkovnikov. "Intelligent Fuzzy Inference-Based Decision-Support System for Marine Main Diesel Engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 18.4 (2026): 755–771. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-755-771.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ГЛАВНЫХ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Н. А. Полковникова, А. К. Полковников

ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»,
Новороссийск, Российская Федерация

Темой исследования является разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений на основе нечеткой логики для судовых дизельных двигателей, направленной на повышение точности диагностики и эксплуатационной надежности в условиях неполных, неопределенных или фрагментарных данных. Актуальность исследования обусловлена возрастающей сложностью параметров, контролируемых судовыми системами автоматизации, а также жесткими требованиями к безопасной и эффективной эксплуатации двигателей, создающими значительные трудности для судовых специалистов при анализе информации в реальном времени. В работе исследованы вопросы применения нечеткой логики, продукционных правил, методов интеллектуального анализа данных и экспертных баз знаний для оценки технического состояния судовых дизельных двигателей, выявления неисправностей на уровне отдельных цилиндров, определения допустимых режимов работы с учетом технических и навигационных условий, прогнозирования постепенно развивающихся неисправностей и определения приоритетов технического

обслуживания. Разработана архитектура интеллектуальной системы поддержки принятия решений, обеспечивающая переход от традиционного мониторинга к интеллектуальному информационно-ориентированному управлению в человеко-машинных системах. Рассмотрены база данных неисправностей и способов их устранения, а также база знаний, формализующая производственные правила с использованием концепции отклонений. Выполнена реализация процедуры нечеткого вывода, включающей фазификацию входных параметров, получаемых из систем мониторинга двигателя, их обработку по методу Мамдани – Заде и дефазификацию результатов для получения оценок состояния двигателя в реальном времени. Система обеспечивает отображение отклонений параметров, вероятных неисправностей и эксплуатационных рекомендаций в графическом интерфейсе. Результаты исследования показывают, что предложенный подход эффективно аппроксимирует экспертное рассуждение, учитывает нелинейности и неопределенности и создает основу для повышения эффективности прогнозного технического обслуживания, оптимизации режимов эксплуатации и повышения общей эффективности работы судовых дизельных двигателей.

Ключевые слова: система принятия решений, база знаний, прогнозное техническое обслуживание, судовой дизельный двигатель, нейро-нечеткая система, лингвистическая переменная, функция принадлежности.

Для цитирования:

Полковникова, Н. А. Интеллектуальная система поддержки принятия решений для главных судовых дизельных двигателей на основе нечеткой логики / Н. А. Полковникова, А. К. Полковников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026 г. Т. 18. № 4. С. 755–771. EDN BUHOAI. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-4-755-771.

Introduction

The continual increase in the number of automation-controlled parameters, combined with stringent requirements for safe and efficient operation, presents significant challenges for ship engineers in analyzing the collected data. Under these circumstances, a crucial means of enhancing the reliability and efficiency of technical exploitation (TE) of main marine diesel engines is the implementation of modern information technologies. These technologies facilitate more accurate utilization of operational modes, support maintenance and repair activities, and provide decision-making assistance to operators.

To address this, an integrated approach to TE of marine engines has been proposed, based on a systematic organization of information and modern information technologies for developing data processing algorithms, detecting and diagnosing malfunctions, forecasting technical condition, and automating decision-support procedures. The newly implemented approach encompasses the following primary TE tasks for main engines: assessment of technical condition and identification of faults; determination of permissible operating modes considering technical and navigational conditions; prevention of sudden failures and forecasting of gradual deterioration; and determination of the scope and priority of maintenance and overhaul activities during intervals between dockings.

Effective problem-solving in this context necessitates the utilization of diverse information sources, including hardware-based technical diagnostics, onboard centralized control systems, and regulatory requirements. To formalize data processing procedures within the information system of marine diesel engines, a methodology has been developed employing statistical models of various types and levels — standard and adaptive, local and integral — which rely on databases of measured parameters, corresponding software, and database models [1–5].

The implementation of a decision-support system (DSS) significantly enhances the efficiency of diagnosing main marine diesel engines, as it enables rapid analysis of diverse operational data, provides informed recommendations for addressing specific malfunctions, accounts for the non-linear and uncertain nature of engine processes, and supports optimal operational decision-making [6–9].

Methods and Materials

In the development of the decision-support system “Diesel Expert”, the computer-aided software engineering (CASE) tool Rational Rose was employed for automation software design. Rational Rose enables the creation of a model of the future system, facilitating the understanding of algorithms and the relationships between objects, which subsequently serves as the basis for the software framework. The

completed model allows early detection of design flaws at a stage when their correction does not entail significant costs.

All classes and diagrams were developed using the Rational Rose code generator via the Ensemble Rose Delphi link. At the initial stage, a use-case diagram was created in Rational Rose to define the functional requirements of the decision-support system. The first user action consists of entering engine measurement data. The system then performs calculations and visualizes the results, identifies malfunctions with recommendations for resolution, generates a report, and updates the database with new faults.

The subsequent step in the Rational Rose environment involved creating interaction diagrams for the application modules (Main Logical View). Figure 1 illustrates the interaction of the DSS modules, whose minimal structural element is a package.

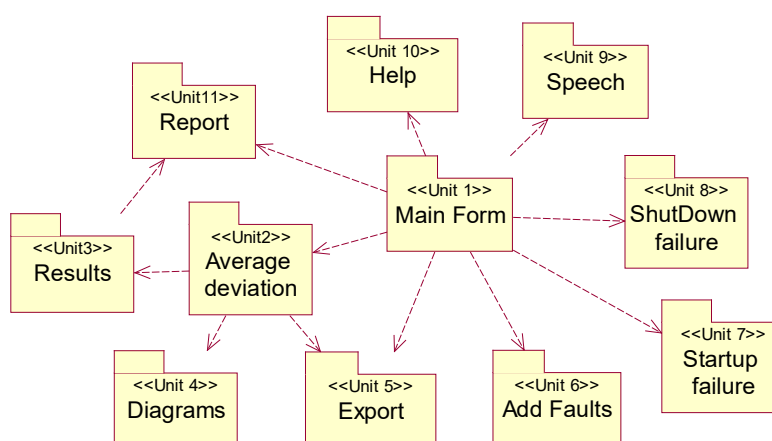


Fig. 1. Interaction diagram of the “Diesel Expert” Decision Support System modules (Main Logical View)

A package includes a functional module and a group of form elements of the program, and is used to define the behavior of higher-level objects in greater detail. Each package corresponds to a software module of the decision support system. At this stage, it was established that all functional capabilities of each module would be accessible from the DSS main window — Unit 1 (Main Form). The interaction diagram of the DSS modules includes the following packages:

- Unit 1 (Main Form) — main window of the DSS;
- Unit 2 (Average Deviation) — calculation of parameter deviations;
- Unit 3 (Results) — display of detected malfunctions and failures and recommendations for their resolution;
- Unit 4 (Diagrams) — charting the calculation results;
- Unit 5 (Export) — exporting tables to MS Office;
- Unit 6 (Add Faults) — adding new malfunctions and failures to the database;
- Unit 7 (Startup Failure) — diagnosis of malfunctions and failures at engine start-up;
- Unit 8 (Shut Down Failure) — diagnosis of failures at engine shut-down;
- Unit 9 (Speech) — voice menu for program control;
- Unit 10 (Help) — help documentation for the program;
- Unit 11 (Report) — report on detected malfunctions and failures with recommended actions.

Further, DSS module prototypes were developed in IBM Rational Rose. For example, the class diagram for Form 3, which displays the detected failures, is presented in fig. 2.

In the center of the diagram, the TForm3 class is located. This class is characterized by a set of events, understood as actions associated with visual or non-visual components presented on the form. It was determined that Form 3 will include two RichEdit components for displaying the detected failures and their corresponding solutions, as well as drop-down and main menus providing options for printing, exporting, adjusting the font, editing the text, and controlling the voice command engine.

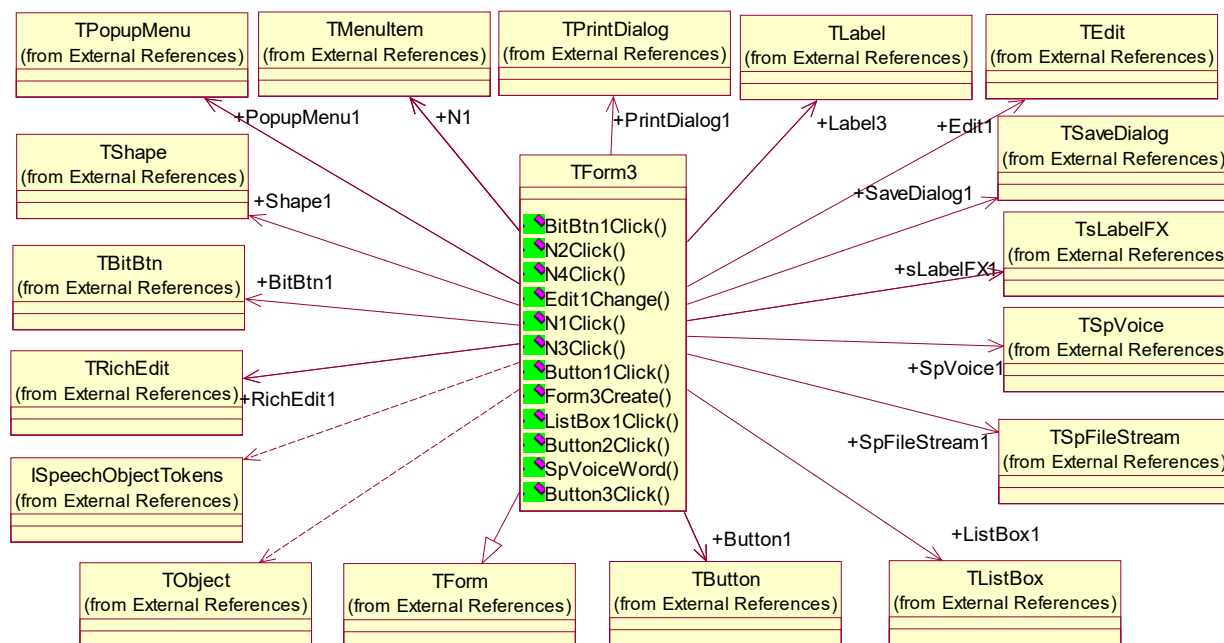


Fig. 2. Class diagram of Form 3 of the “Diesel Expert” Decision Support System

This form incorporates three types of relationships between classes:

- Generalization (solid arrows) — a relationship indicating that TForm3 is a child of the program’s main form TForm, since all raw data required for calculating and detecting failures are entered through the main form.
- Dependency (dashed arrows) — a relationship showing that, within this form, the classes ISpeechObjectTokens (responsible for reading troubleshooting solutions using Russian and English voice engines) and TObject (used for generating reports in MS Word) are imported from the main form acting as a server. In other words, TForm3 relies on ISpeechObjectTokens and TObject as parameters in various methods.
- Unidirectional association (empty-headed arrow) — a one-way communication relationship, representing the most common and weakest form of interaction between a class and another class or interface.

As a result, a detailed model of the interface classes, the key architectural features of the system, and full lifecycle support were developed. The underlying idea of this approach is the use of reverse engineering (round-trip engineering), in which any modifications to the source code are automatically reflected in the constructed object model, and, conversely, changes made to classes, methods, or other elements within the object model accordingly update and correct the source code.

The DSS “Diesel Expert” includes a failure database and a troubleshooting solution database, as well as a knowledge base containing rules for identifying failures. In the formalization of the procedures for assessing the technical condition, the “concept of deviations” was employed. The identification of failures in individual cylinders is performed using the developed diagnostic matrix. The operator is provided with a graphical representation of the numerical deviation parameters for each cylinder on the monitor screen, along with a textual message indicating the probable failure.

The DSS “Diesel Expert” is also capable of diagnosing start-up and shut-down engine failures using a step-by-step question-answer mode. By responding to the proposed questions, the mechanic constructs a logical chain that reduces the time required to identify the relevant troubleshooting nodes. This question–answering approach is classical for DSSs, as the earliest systems operated in this manner. Its main advantage lies in the close approximation of the expert’s real diagnostic reasoning. However, its drawback emerges in situations involving a large number of diagnostic questions, which may lead to

significant time losses. According to research conducted by George Miller, human short-term memory is capable of holding approximately 7 to 9 entities simultaneously. Therefore, this question-answering mode is optimal when limited to 7 ± 2 questions, a principle implemented in the “Diesel Expert” system. The architectural features of the developed DSS were examined in the context of three key performance characteristics: speed, flexibility, and understandability.

“Diesel Expert” fully meets the requirements for flexibility: the fault database can be modified and extended during the development process. The system also satisfies the requirements for clarity: the DSS incorporates Microsoft Office Assistant technology, which supports the user in performing the correct steps and actions, and it includes speech recognition technology based on the Microsoft Speech API for voice menu interaction, along with Russian voice engines (Digalo and Elan). Finally, the DSS provides the necessary speed for problem-solving under open-sea operating conditions.

The integration of data mining tools into the DSS represents an innovative approach to database analysis for interpreting indicator results in marine diesel engine failure diagnostics. Figure 3 presents the architecture of the DSS designed for deployment under vessel operating conditions.

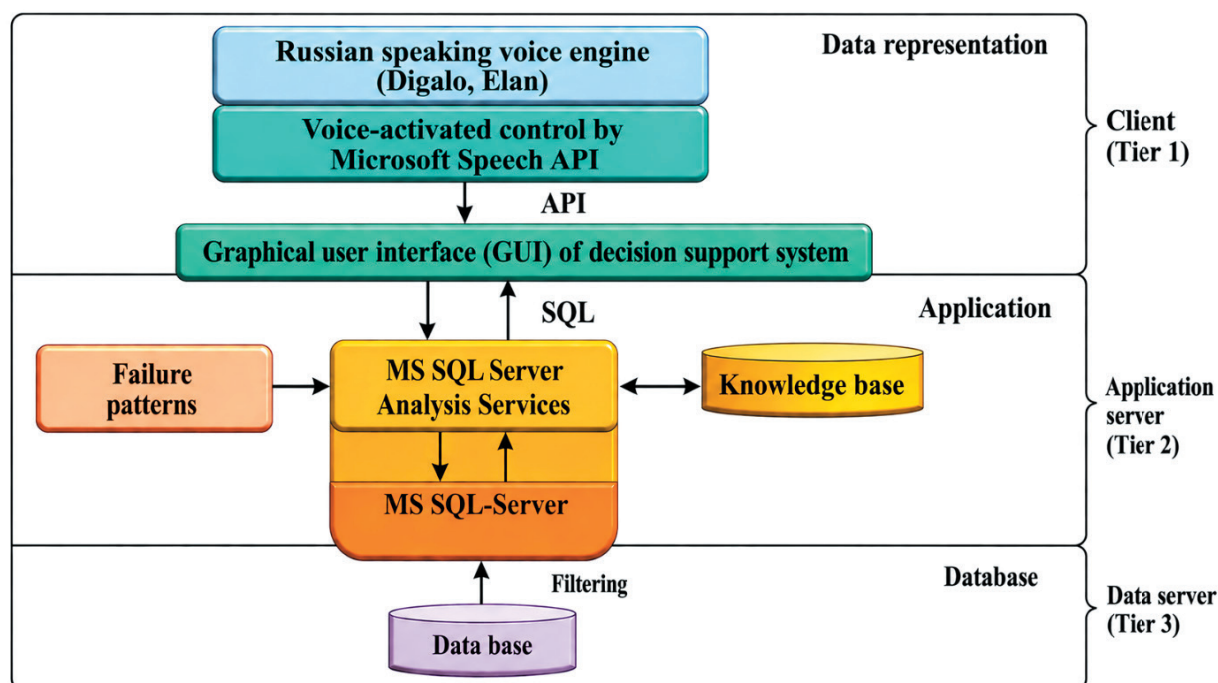


Fig. 3. Three-tier architecture of the “Diesel Expert” Decision Support System

The main feature of the proposed DSS architecture is its logical division into three components (three tiers): a client (tier 1), an application server (tier 2), and a data server (tier 3), each of which can operate on a separate machine. These components interact with one another by exchanging messages in a predefined format (API calls, SQL queries, and filtering operations).

Advantages of the proposed architecture: the three-tier architecture, compared with two-tier architectures (client-server or file-server), offers the following benefits:

- high reliability and security;
- configurability — the isolation of layers from one another allows rapid and straightforward reconfiguration within a single layer in case of a failure or during scheduled maintenance;
- low performance requirements and minimal technical specifications for client terminals.

The distinctive feature of the developed DSS “Diesel Expert” is the incorporation of a voice interface, which provides the following advantages:

- efficient and natural interaction;
- minimal requirements for user training;

- the ability to use both manual input devices (keyboard, computer mouse) and voice input;
- enhanced operator mobility during the control process.

The structure of the implemented voice interface comprises two core components:

- voice recognition for DSS control using the Microsoft Speech API 5.1 library;
- speech synthesis for reading aloud the identified troubleshooting results, implemented with the Russian Digalo and Elan text-to-speech engines.

All knowledge contained in the knowledge base is categorized into algorithmic and non-algorithmic types. Algorithmic (procedural) knowledge includes algorithms that compute functions and transformations for strictly defined tasks. In formalizing procedures for assessing technical conditions, the “concept of deviations” is employed. According to marine diesel engine maintenance regulations, parameter deviations of each cylinder from the average values shall not exceed the following limits:

1. Mean indicated pressure $\Delta p_{mi} \pm 2.5 \%$;
2. Maximum cylinder pressure $\Delta p_{max} \pm 3.5 \%$;
3. Compression end pressure $\Delta p_c \pm 2.5 \%$;
4. Exhaust gas temperature $\Delta t_g \pm 5 \%$.

The fuzzy DSS incorporates a failures database and a troubleshooting solutions database, while the knowledge base contains production rules used for failure identification. To formalize the production rules and the procedures for assessing technical conditions, the “concept of deviations” is applied. Failure identification for individual cylinders is performed using the developed diagnostic matrix. The operator receives a graphical display on the monitor showing the numerical values of parameter deviations across the cylinders, accompanied by a textual message indicating the probable failure.

Results

Figure 4 presents the main DSS window, which includes the primary menu, the table of current workflow settings, the fuel supply parameters for each cylinder with the computation of mean values, the engine reference parameters, and an interactive form for engine failure diagnostics during start-up and shutdown. The fuzzy logic module is invoked by pressing the “Fuzzy Logic Diagnosis” button in the main DSS window.

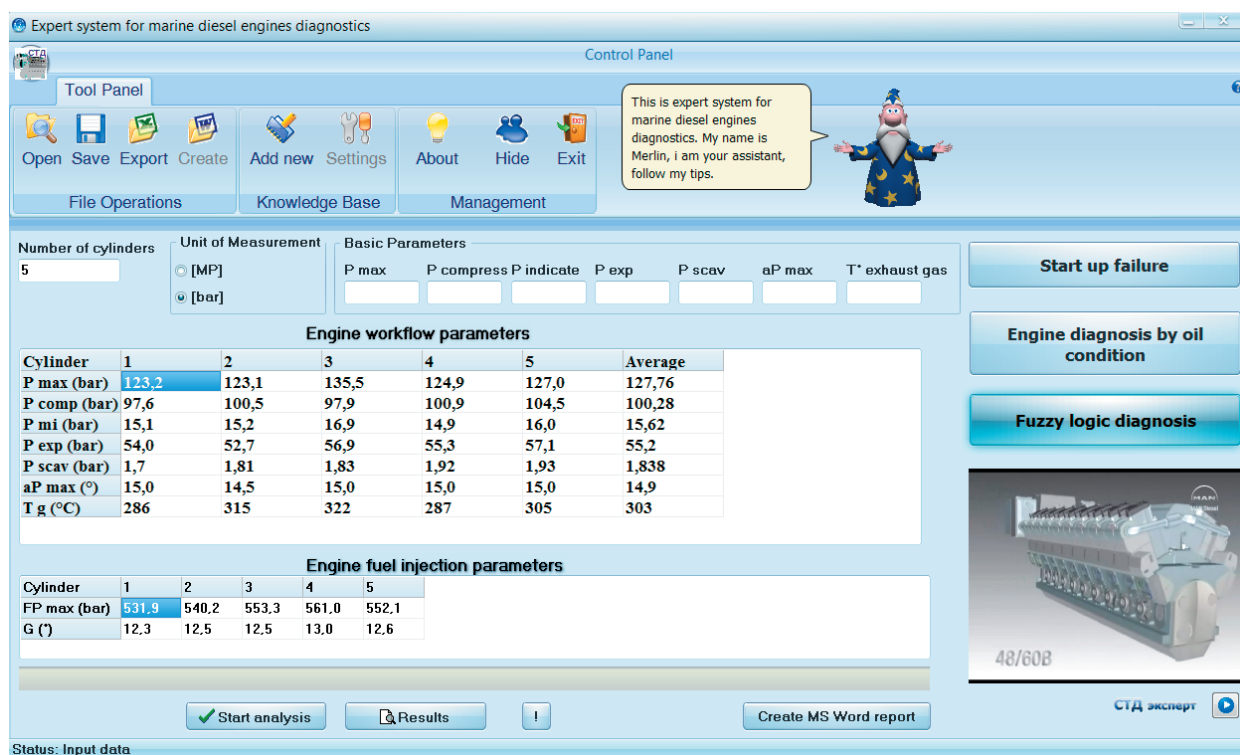


Fig. 4. Main window of the DSS “Diesel Expert”

The fuzzy-logic-based DSS represents a set of production rules formulated by experts in natural language to formalize complex diagnostic procedures that are difficult to express using strict mathematical models. The fuzzy DSS makes it possible to account for uncertainties and to validate the resulting conclusions by simulating the reasoning of a fuzzy inference engine grounded in expert professional experience.

Figure 5 presents the block diagram of the fuzzy-logic-based DSS. The engine, operating under specific conditions, is treated as a dynamic system characterized by a defined set of parameters at any given moment. The monitoring system acquires engine data and provides it to the operator. The operator then inputs these data into the DSS and initiates the processing mechanism.

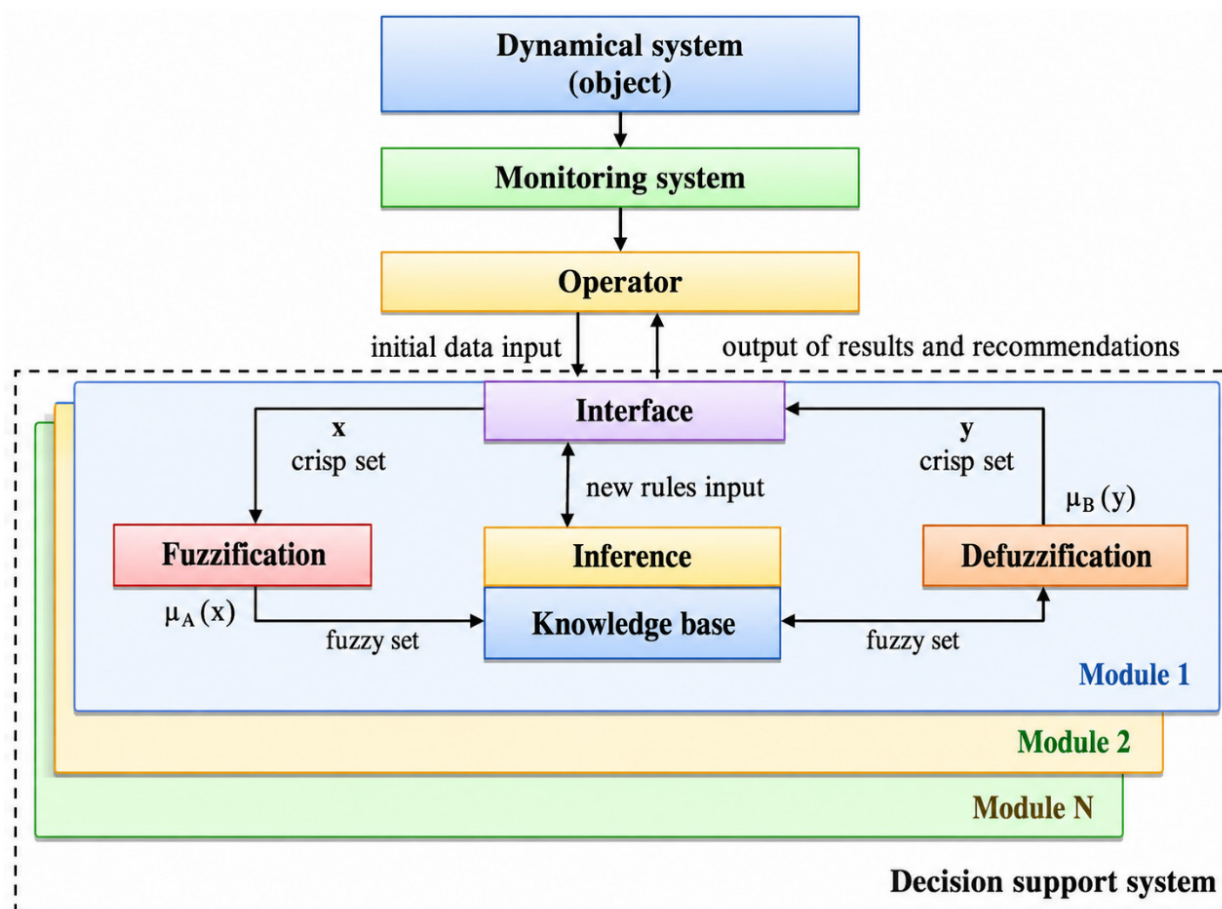


Fig. 5. Block diagram of the fuzzy-logic-based decision support system

Fuzzification is the process of converting crisp input data into fuzzy sets by means of membership functions. The purpose of the fuzzification step is to establish a correspondence between the numerical values of the individual input variables and the corresponding values of their membership functions, associated with linguistic variables. The input data are represented as a vector: $x = (x_1, x_2, \dots, x_i) \in X$, where i denotes the number of diagnostic parameters obtained from the monitoring system. Each parameter is then assigned a linguistic evaluation in accordance with the predefined membership functions of the system [10–12]. As a result, the crisp set of input parameters is transformed into a fuzzy set $\mu_A(x)$, which is used as a set of input linguistic values in the logical rules of the knowledge base.

Defuzzification is the inverse operation, in which a fuzzy set is transformed into a crisp set $\mu_B(y)$. In the considered system, the output values can be interpreted as the probabilities of individual failures: $y = (y_1, y_2, \dots, y_j) \in Y$, where j denotes the number of failure modes (or system states). The resulting fuzzy set of system states is characterized by the membership function $\mu_{A \rightarrow B}(y)$ defined on the output variable y .

Thus, failure identification is performed by estimating the probabilities of the corresponding failure modes. Such a system is referred to as a Mamdani-Zadeh fuzzy inference system (FIS). The choice of a Mamdani-Zadeh fuzzy model is motivated by the fact that the rules in the knowledge base are clear and intuitive, whereas in Takagi-Sugeno-Kang (TSK) FIS the appropriate linear input-output relationships are not always obvious and may be difficult to determine [13–18].

The proposed structural scheme of a fuzzy-logic-based decision support system can be applied both to systems for assessing the technical condition of equipment and to decision support systems for complex processes, in cases where no adequate mathematical model is available and expert knowledge about the object or process can be formulated in linguistic terms. The operation of main marine diesel engines is characterized by significant variability: varying load regimes, changing navigation and environmental conditions, transitions between different fuel types, and the influence of human factors. Therefore, taking into account the objectively existing uncertainty, as well as incomplete and imprecise information about the object, it is reasonable to employ fuzzy logic for failure identification [19, 20].

To construct the rules, fuzzy set theory is employed. Each variable is represented as a linguistic variable with characteristic terms such as “high”, “medium”, ... “low”, “very low”. This means that the knowledge base describes the influence of the independent variables $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ on the value of y in the form of a collection of logical statements of the following type:

$$\begin{array}{ll}
 \text{IF} & (x_1 \text{ is } a_{1j1}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } a_{2j1}) \text{ AND } \dots \text{ AND } (x_n \text{ is } a_{nj1}) \\
 \text{OR} & (x_1 \text{ is } a_{1j2}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } a_{2j2}) \text{ AND } \dots \text{ AND } (x_n \text{ is } a_{nj2}) \\
 & \vdots \\
 \text{OR} & (x_1 \text{ is } a_{1jk_j}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } a_{2jk_j}) \text{ AND } \dots \text{ AND } (x_n \text{ is } a_{nj k_j}) \\
 \text{THEN} & y \text{ is } d_j, j \in [1, m].
 \end{array}$$

Here a_{ijp} is the linguistic term used to evaluate the variable x_i in the antecedent row with index p corresponding to the consequent term d_j ($p \in [1, k_j]$); k_j is the number of conjunctive rows whose consequent is evaluated by the term d_j ; and m is the number of terms used for the linguistic evaluation of the output parameter y . Thus, in general, the rule-based fuzzy knowledge base can be represented as follows:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[\bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \right] \rightarrow y = d_j, j \in [1, m]. \quad (1)$$

This expression can be interpreted as follows: IF (conjunctive row 1) OR (conjunctive row 2) OR ... OR (conjunctive row k_j) is satisfied, THEN the output y is evaluated by the linguistic term d_j . Here, the symbol $\cap$ — plays the role of the logical AND operator and denotes $(x_1 = a_1^{jp}) \text{ AND } (x_2 = a_2^{jp}) \text{ AND } \dots \text{ AND } (x_n = a_n^{jp})$, that is, the simultaneous satisfaction of all conditions for all input variables in the row with index p . The symbol $\cup$ — plays the role of the logical OR operator and denotes the disjunction (union) of all conjunctive rows whose consequent is the term d_j , means that at least one of these conjunctive rows (for $p = 1, \dots, k_j$) is satisfied.

The knowledge base can be constructed using either Mamdani-Zadeh fuzzy inference or a TSK FIS. The Mamdani-Zadeh knowledge base is constructed by approximating the dependence $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ using a fuzzy rule base and operations on fuzzy sets. The TSK FIS knowledge base is analogous to the Mamdani-Zadeh knowledge base, except that the rule consequents d_j are specified not as fuzzy terms, but as linear functions of the inputs:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[\bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \right] \rightarrow y = b_{j0} + \sum_{i=1}^n (b_{ji} \cdot x_i), j \in [1, m]. \quad (2)$$

Here, b_{j0} is the constant term (intercept) for the j -th rule corresponding to the output term, and b_{ji} are the coefficients associated with the input variables x_i . Instead of a linguistic term d_j (as in the Mamdani-Zadeh case), the output y is specified by a linear function of the inputs; for $j \in [1, m]$, a separate group of TSK-type rules is defined for each of the m output terms.

In a TSK FIS the rules in the knowledge base define local linear input-output models, and the system output is computed as a weighted blend of these models according to the rule firing strengths, rather than by hard switching among them. While a Mamdani-Zadeh knowledge base is typically constructed through expert elicitation, a TSK knowledge base is particularly amenable to data-driven identification and is therefore suitable when detailed knowledge of the system is limited.

Construction of a TSK FIS model is carried out in two stages. In the first stage, fuzzy rules are synthesized from experimental data using clustering. In the second stage, the parameters of the fuzzy model are tuned using the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) algorithm. Figure 6 depicts a functional block diagram for cylinder fault diagnosis in the Matlab FIS Editor. The inputs are cylinder parameters derived from engine indicator measurements, and the outputs are the estimated likelihoods (e.g., probabilities or membership degrees) of the candidate cylinder faults.

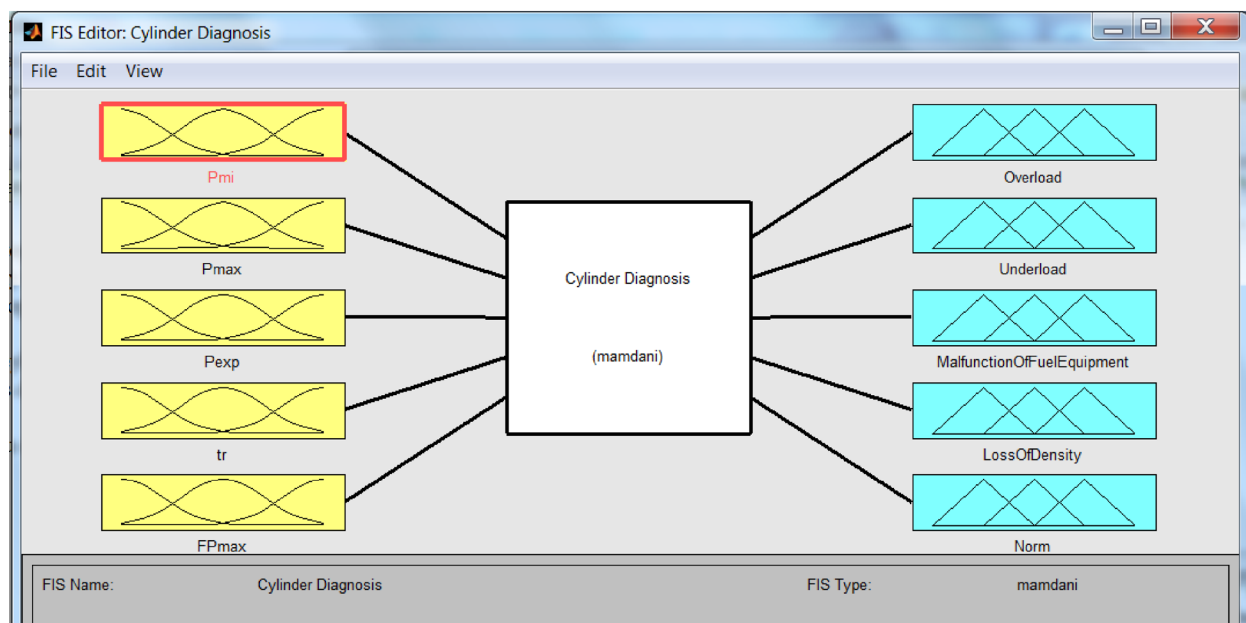


Fig. 6. Functional block diagram of fuzzy fault identification

The cylinder can have the following states: overloaded, underloaded, malfunction of the fuel injection equipment (FIE), loss of density, and normal state. Each parameter has its range of change. The linguistic evaluation value of each variable is performed using three terms: low, normal, and high. Membership function has a trapezoidal shape: $y = \text{trapmf}(x, [a, b, c, d])$, where the argument a is the minimum allowable value with zero probability of normal state, the interval between the arguments $[b, c]$ shows the parameter belonging to the normal state with probability 1. And, correspondingly, the argument d is the maximum allowable value with zero probability of a normal state. The choice of trapezoidal membership functions is caused by the fact that normal state probability is determined not by a single variable value, but by some range of acceptable values. The low value of mean indicated pressure p_{mi} is in the range $[15...15,6]$, normal — $[15,6 ... 16,4]$ and high is $[16,4 ... 17]$ (fig. 7).

The parameter values for the linguistic variable range have been calculated in accordance with acceptable deviations in technical regulations from average values. For mean indicated pressure possible values are the following set:

$$p_{mi} = (15; 15.3; 15.6; 16; 16.4; 16.6; 17). \quad (3)$$

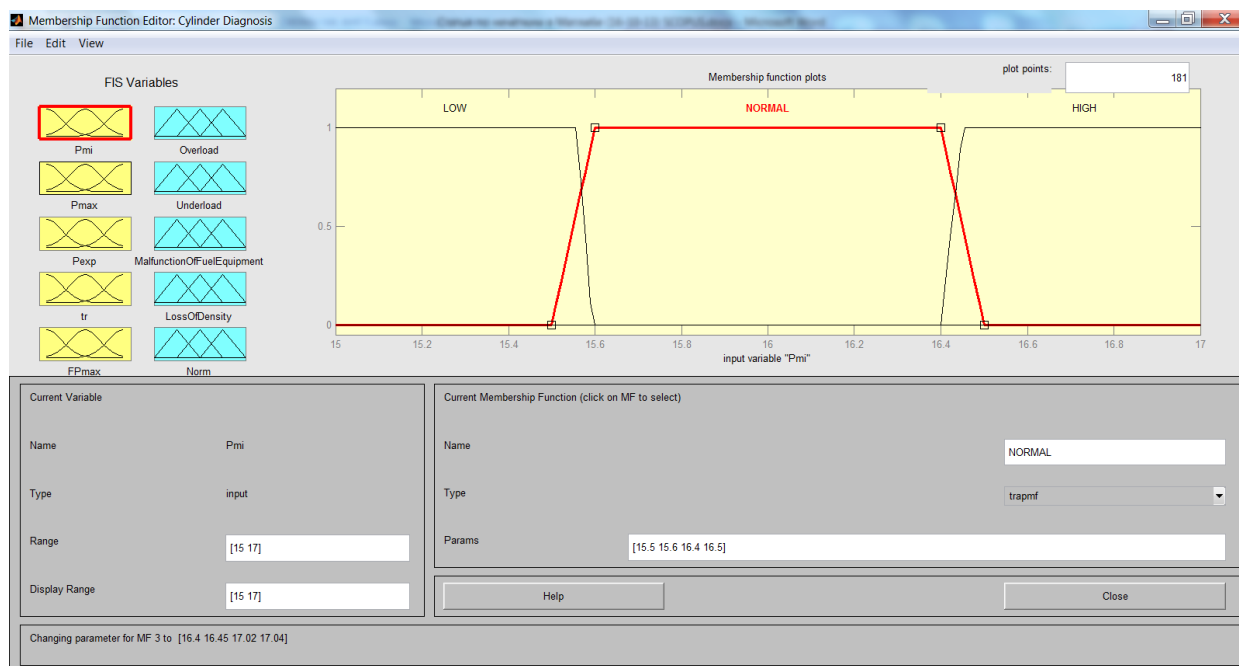


Fig. 7. Membership functions of the mean indicated pressure (p_{mi})

Each element in set has its degree of membership: the higher the degree of membership, the greater the probability that the parameter value is the norm. Membership functions or information for their construction are given by experts on the basis of subjective preferences and are not random. The resulting fuzzy set has the following form:

$$\tilde{A}_{p_{mi}} = \left(\frac{0}{15}, \frac{0.3}{15.3}, \frac{1}{15.6}, \frac{1}{16}, \frac{1}{16.4}, \frac{0.5}{16.6}, \frac{0}{17} \right). \quad (4)$$

Since the p_{mi} set is finite and contains 7 elements, the fuzzy set $\tilde{A}_{p_{mi}}$ can be written as:

$$\tilde{A}_{p_{mi}} = \sum_{i=1}^7 \frac{\mu_A(P_{mi_i})}{P_{mi_i}}, \quad (5)$$

where $\mu_A(P_{mi_i})$ — is the membership degree of $P_{mi_i} \in P_{mi}$ to fuzzy set $\tilde{A}$. The membership degree is a number from the range [0...1]. The higher the degree of membership, the more the element of the set corresponds to the properties of the fuzzy set. For the parameter p_{mi} membership functions have three qualitative representations, which fuzzy inference mechanisms mathematically formalized in the following way:

$$\mu_{low}(p_{mi}) = \begin{cases} 1 & 15 \leq p_{mi} \leq 15.5; \\ 1 - \frac{p_{mi} - 15.5}{15.6 - 15.5} & 15.5 < p_{mi} \leq 15.6; \\ 0 & 10 \leq p_{mi} < (15 \vee p_{mi}) 15.6; \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{normal}(p_{mi}) = \begin{cases} \frac{p_{mi} - 15.5}{15.6 - 15.5} & 15.5 \leq p_{mi} < 15.6; \\ 1 & 15.6 \leq p_{mi} \leq 16.4; \\ 1 - \frac{p_{mi} - 16.4}{16.5 - 16.4} & 16.4 < p_{mi} \leq 16.5; \\ 0 & 10 \leq p_{mi} < 15.5 \vee p_{mi} > 16.5; \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{high}(p_{mi}) = \begin{cases} \frac{p_{mi} - 16.3}{16.5 - 16.3} & 16.3 \leq p_{mi} < 16.5; \\ 1 & 16.5 \leq p_{mi} \leq 17; \\ 0 & p_{mi} < 16.3. \end{cases} \quad (8)$$

After completing fuzzification, all input variables have identified specific values of membership functions for each of the linguistic terms, which are used in terms of “IF parameter N IS (low/ normal/ high)” in the rule base of the fuzzy inference system.

Thus, the application of fuzzy logic in conjunction with other diagnostic algorithms, allows for approximating the experts’ logic and this system can be attributed to the class of hybrid DSS.

At defuzzification stage, the inverse problem of fuzzification is solved — an unambiguous solution is formed regarding the value of the output variable based on fuzzy conclusions. The defuzzifier converts the range of the output variable into one specific value that is accepted as the output of the entire system. Figure 8 shows the operation of fuzzy logic inference based on the results of marine diesel engine indication in case of FIE malfunction, the confidence levels are determined in the range [0...1]. In the considered case, the FIE malfunction was determined with a confidence level of 0.9.

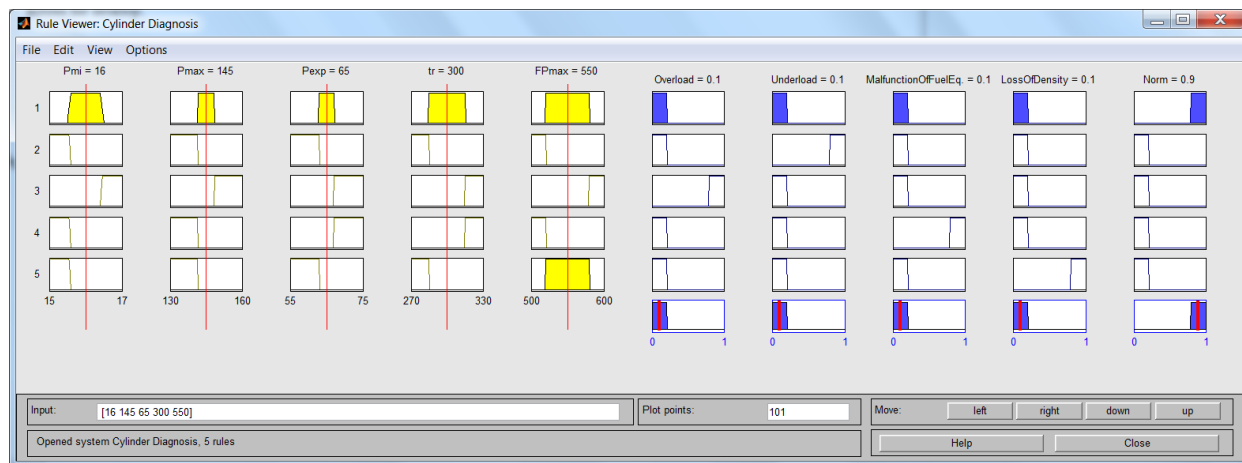


Fig. 8. Visualization of fuzzy inference for a fuel injection equipment malfunction

Based on the results of fuzzy logic inference, an “input-output” surface was obtained (fig. 9), showing the dynamics of fuel injection equipment malfunction.

The surface displays the probability (confidence levels) of malfunction of fuel injection equipment when changing values of the input parameters: mean indicated pressure (p_{mi}) and maximum cylinder pressure (P_{max}).

At the second stage of constructing the fuzzy model, the parameters of fuzzy inference system are identified using the ANFIS learning algorithm. ANFIS is a hybrid neuro-fuzzy system that implements a zero- or first-order TSK FIS in the form of a feedforward neural network. The ANFIS architecture is isomorphic to the corresponding fuzzy knowledge base: the network has multiple inputs and a single output, and the input variables are modelled as fuzzy linguistic variables with

associated terms. In this implementation, the network inputs are not organized as a separate input layer. Figure 10 shows the resulting five-layer ANFIS network used for the identification of faults in the fuel injection equipment.

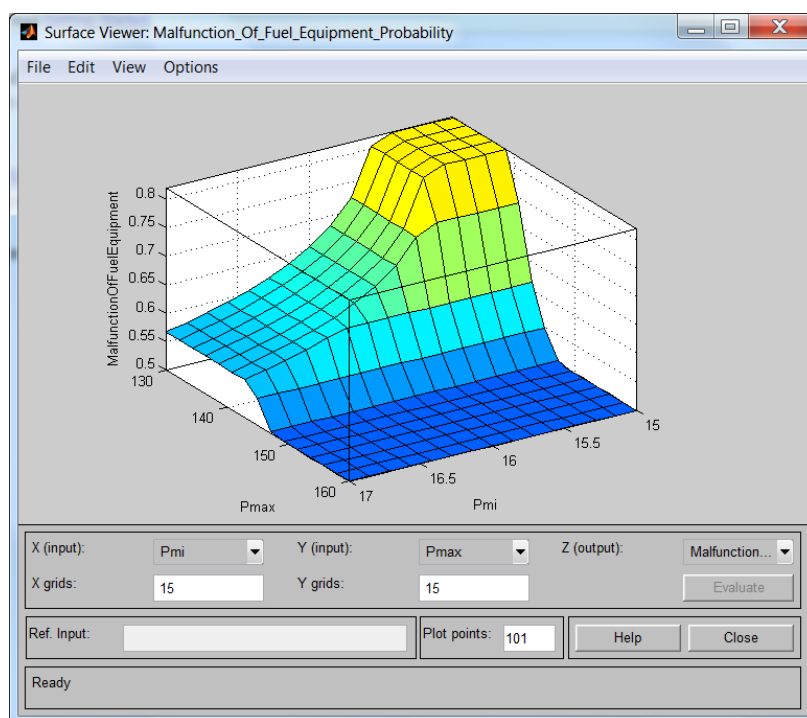


Fig. 9. Synthesized input-output surface for a fuel injection equipment malfunction

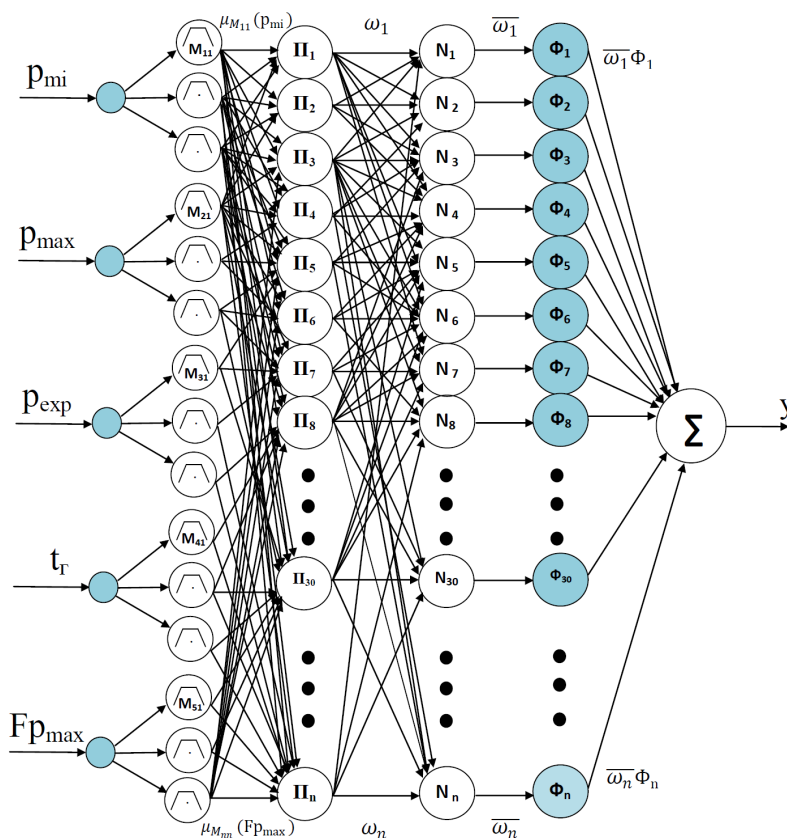


Fig. 10. Developed ANFIS architecture for fault identification

Each node in the first layer implements a trapezoidal membership function corresponding to a single fuzzy linguistic term. The output of a first-layer node is the membership degree of the value of the input variable in the associated fuzzy set. Each node in the second layer represents a single fuzzy rule. A second-layer node is connected to those first-layer nodes that define the antecedent part of the corresponding rule. The output of a second-layer node is the firing strength (activation level) of the rule, computed as the product of its input signals. The roles of the layers are as follows:

1. The first layer represents the terms of the input variables. In this layer, fuzzification is performed by computing the values of the corresponding membership functions:

$$\mu_{M_m}(P_{mi}, P_{\max}, P_{\exp}, t_g, FP_{\max}). \quad (9)$$

2. Second layer — antecedents of the fuzzy rules; this layer computes the activation levels, i.e., the truth degrees of the left-hand side of each rule, replacing the logical “AND” with a product:

$$\omega_1 = \mu_{M_{11}}(P_{mi}) \wedge \mu_{M_{21}}(P_{\max}) \wedge \mu_{M_{31}}(P_{\exp}) \wedge \mu_{M_{41}}(t_g) \wedge \mu_{M_{51}}(FP_{\max}). \quad (10)$$

In general, the group with the term “low” for the input vector x can be represented as an algebraic product:

$$\mu_{M_{N1}}(x) = \prod_{j=1}^N \mu_{M_{N1}}(x_j). \quad (11)$$

Thus, the output of the node is the firing strength of the rule, computed as the product of its input signals.

3. The third layer performs the normalization of the rule firing strengths:

$$\bar{\omega}_n = \frac{\omega_n}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n}. \quad (12)$$

4. The fourth layer represents the rule consequents and computes the values of the weighted output components Φ_n :

$$\bar{\omega}_n \Phi_n = \bar{\omega}_n (c_{i1}P_{mi} + c_{i2}P_{\max} + c_{i3}P_{\exp} + c_{i4}t_g + c_{i5}FP_{\max}). \quad (13)$$

5. The fifth layer aggregates the results obtained from the individual rules. The single neuron in this layer performs the defuzzification operation:

$$y = \sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i \Phi_i. \quad (14)$$

The input data consist of engine operating measurements corresponding to a one-year interval of operation during which faults in the fuel injection equipment occurred. With a sampling period of one month, the training dataset therefore contains 12 measurements (fig. 11a).

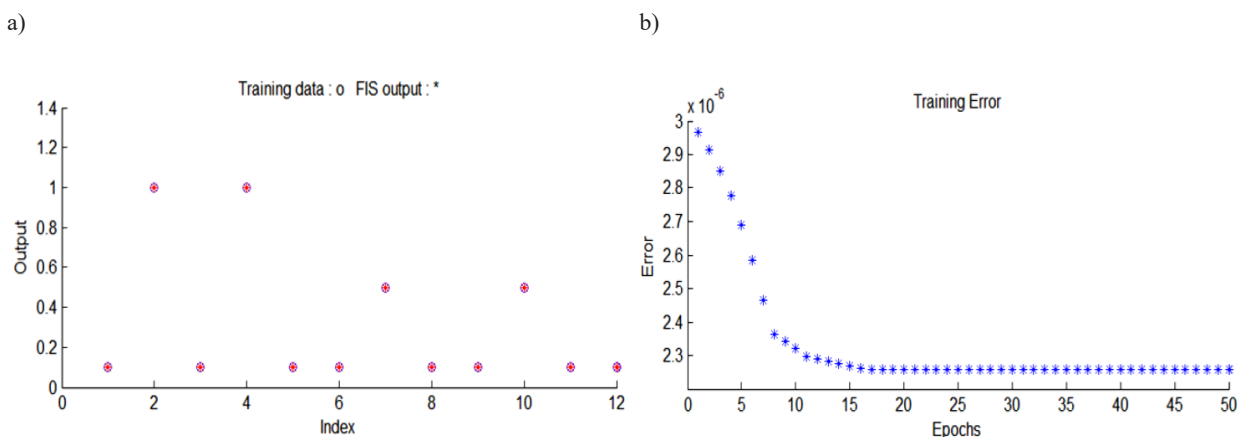


Fig. 11. Tuning of the TSK ANFIS model:
(a) training result on the initial dataset; (b) training error over 50 iterations

Training of the neural network reduces to tuning the parameters of the membership functions so that the training error is minimized. The objective of training is to determine the weights of the neurons in each layer of the network such that, for a given input vector, the output signals y_j^r are, within a prescribed accuracy, equal to the desired values d_j^r for all training samples $j = 1, 2, \dots, P$. The neural network is trained using the backpropagation algorithm, which is a standard and widely used gradient-based method for supervised learning in multilayer feedforward neural networks. The network parameters are optimized by minimizing a quadratic loss function, defined as the sum of squared differences between the actual and target output values over all training samples. Training of the neural network consists in adjusting the parameters of the membership functions such that the training error is minimized:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^R (y^r - d^r)^2, \quad (15)$$

where y^r is the actual response of the neural network to the input vector X^r :

$$X^r = (P_{mi}^r, P_{\max}^r, P_{\exp}^r, t_g^r, FP_{\max}^r)^T,$$

d^r — the desired output value of the neural network;

R — the size of the training dataset.

For a larger number of training samples j ($j = 1, 2, \dots, P$) the objective function becomes a sum over all samples:

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^P \sum_{r=1}^R (y_j^r - d_j^r)^2. \quad (16)$$

The training error of the neural network after 50 iterations amounted to $2,3 \times 10^{-6}$ (fig. 11b). Figure 12 presents the resulting ANFIS network for identifying FIE malfunctions, where the input neurons correspond to five diagnostic parameters: $P_{mi}^r, P_{\max}^r, P_{\exp}^r, t_g^r, FP_{\max}^r$.

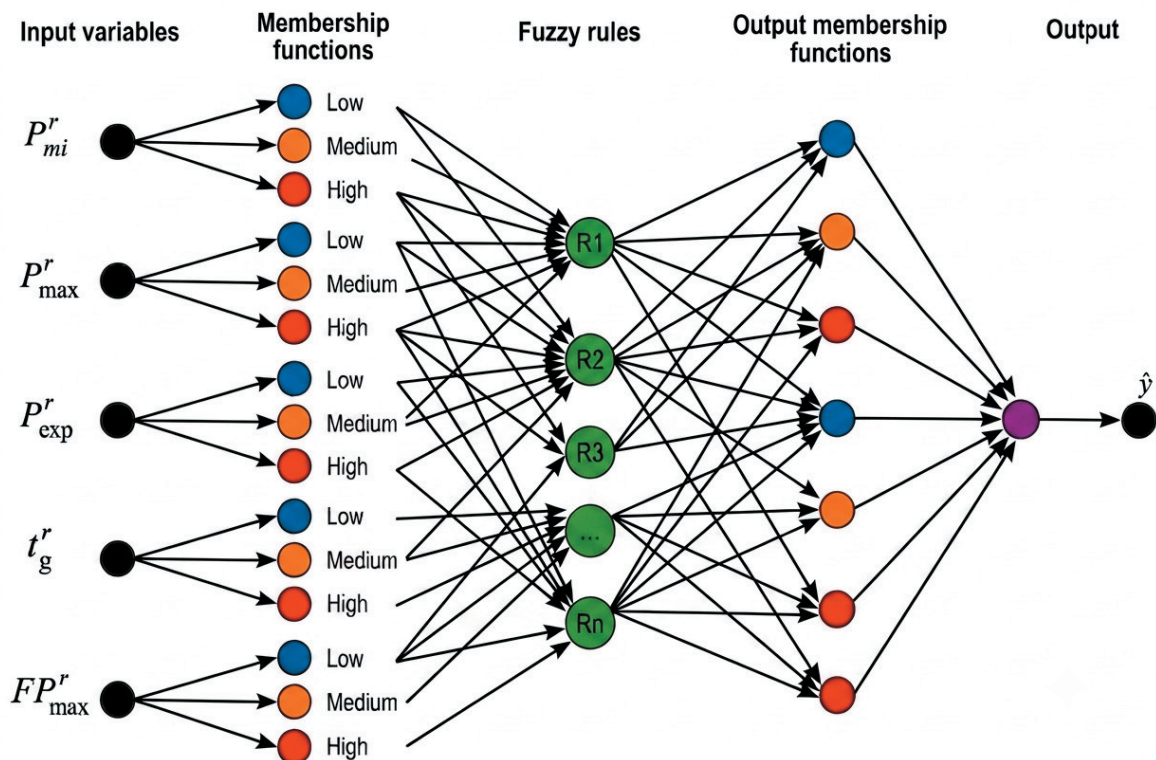


Fig. 12. Architecture of the generated TSK ANFIS model

Discussion

The verification of the constructed hybrid ANFIS model was performed using the results of fuzzy inference for the corresponding values of the input variables obtained from the developed Mamdani-Zadeh-based fuzzy model. Compared with the Mamdani-Zadeh algorithm, the TSK FIS offers several significant advantages:

- 1) high accuracy, particularly when a large number of training samples is available;
- 2) assurance of continuity of the response surface;
- 3) hybrid nature of the algorithm, as the rules contain antecedents in the form of fuzzy sets and consequents in the form of crisp linear functions.

A known limitation of the TSK algorithm is its less interpretable reasoning mechanism. Based on the results of fuzzy inference, an input-output response surface describing the dynamics of the fuel injection equipment fault progression was obtained (fig. 13).

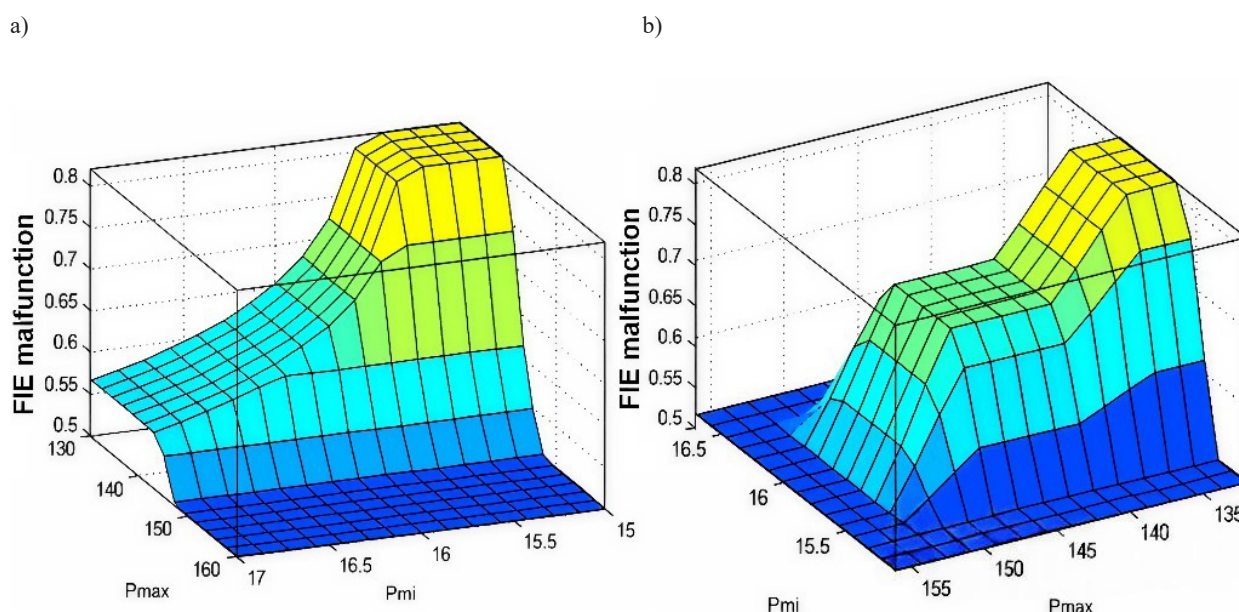


Fig. 13. Assessment of the probability of fuel injection equipment malfunction:
(a) based on the Mamdani-Zadeh approach; (b) based on the TSK ANFIS model

The surfaces represent the probability of fuel injection equipment malfunction as a function of changes in the input parameters. The probability of fuel system malfunction reaches its maximum value of 0.75-1 under the following conditions: $p_{mi} = 15$ bar, $p_{max} = 131$ bar, $p_{exp} = 71$ bar, $t_g = 325$ °C, and maximum fuel pressure in the high-pressure fuel line $FP_{max} = 505$ bar. Verification demonstrates the consistency of the neural network and confirms its adequacy within the considered model.

Conclusion

This article presents a methodology for developing intelligent automated information and diagnostic systems by employing knowledge bases, databases, and algorithms for formalizing procedures in the design of decision support systems (DSS) for marine diesel engines. Effective approaches to integrating heterogeneous knowledge within a DSS aimed at solving maintenance and operational problems of marine diesel engines are proposed. The “Diesel Expert” DSS is intended for use on very large crude carriers (VLCCs) and performs mathematical processing of current measurements as well as analysis of historical data. A voice interface, combined with an embedded intelligent agent, enables interactive communication with the system. The operator (marine engineer) receives substantiated recommendations and explanatory information that support the resolution of technical and operational problems and facilitate well-founded decision-making.

The DSS architecture supports diagnostics of main marine diesel engines based both on objective data acquired from onboard measuring equipment and on subjective expert knowledge, thereby classifying the system as a hybrid DSS. The developed methods, models, and algorithms implemented in “Diesel Expert” ensure high reliability and adequacy of decisions under conditions of uncertainty and inaccuracy of the initial information, while reducing the time and financial costs associated with collecting precise and complete input data, which in practice may be unattainable. Uncertainty is represented using the fuzzy set formalism, and the DSS integrates fuzzy logic, neural networks, and genetic algorithms, which together provide capabilities for uncertainty handling, learning, and self-adaptation.

The application of fuzzy logic in “Diesel Expert” formalizes the procedure for assessing the technical condition of systems on the basis of fragmentary, unreliable, and potentially inaccurate information, making it possible to identify borderline states of complex technical objects with high probability. Neural-network methods support effective approximation of both linear and complex nonlinear relationships, improving the quality of diagnostics and thereby contributing to a significant reduction in the occurrence of emergency situations. The paper presents the implementation of the “Diesel Expert” knowledge base, built on fuzzy-logic and neural-network technologies for fault detection in the main marine diesel engine using process and fuel-supply parameters. The proposed DSS enables timely and accurate tracking of an increasing probability of malfunction in response to variations in the input parameters in real time.

REFERENCES

1. Talpur, N., S. J. Abdulkadir and H. Alhussian et al. “Deep Neuro-Fuzzy System application trends, challenges, and future perspectives: a systematic survey.” *Artificial Intelligence Review* undefined (2022). DOI: 10.1007/s10462-022-10188-3.
2. Júnior, J. S. S., J. Mendes, F. Souza and C. Premebida. “Survey on Deep Fuzzy Systems in Regression Applications: A View on Interpretability.” *International Journal of Fuzzy Systems* 25.7 (2023): 2568–2589. DOI: 10.1007/s40815-023-01544-8.
3. Castillo, O., F. Valdez, P. Melin and W. Ding. “A Survey on Type-3 Fuzzy Logic Systems and Their Control Applications.” *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 11.8 (2024): 1744–1756. DOI: 10.1109/JAS.2024.124530.
4. Tang, H. H. and N. S. Ahmad. “Fuzzy logic approach for controlling uncertain and nonlinear systems: a comprehensive review of applications and advances.” *Systems Science & Control Engineering* 12.1 (2024): 2394429. DOI: 10.1080/21642583.2024.2394429.
5. Dumitrescu, C., P. Ciotirnae and C. Vizitiu. “Fuzzy Logic for Intelligent Control System Using Soft Computing Applications.” *Sensors* 21.8 (2021). DOI: 10.3390/s21082617.
6. Gharib, H. and G. Kovács. “Implementation and Possibilities of Fuzzy Logic for Optimal Operation and Maintenance of Marine Diesel Engines.” *Machines* 12.6 (2024). DOI: 10.3390/machines12060425.
7. Sutanto, H., I. Sutrisno and P. Ju. M. Senda et al. “Development of a fuzzy control system for optimizing fuel consumption on ship main propulsion engines.” *Edelweiss Applied Science and Technology* 9.5 (2025): 489–500. DOI: 10.55214/25768484.v9i5.6928.
8. Wang, Z., S. Zhou, Y. Feng and Y. Zhu. “EGR modeling and fuzzy evaluation of Low-Speed Two-Stroke marine diesel engines.” *Science of The Total Environment* 706 (2020): 135444. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135444.
9. Sutanto, H., A. W. B. Santosa et al. “Development of a fuzzy control system for optimizing fuel consumption on ship main propulsion engines.” *Edelweiss Applied Science and Technology* 9.5 (2025): 489–500. DOI: 10.55214/25768484.v9i5.6928.
10. Skonieczna, D., P. Szczyglak and M. Lemecha. “Modelling lubricating oil wear using fuzzy logic.” *Combustion Engines* 197.2 (2024): 42–49. DOI: 10.19206/CE-183186.
11. Wojtaszek, M., G. Korpała, K. Zyguła, K. Cichocki, K. Kowalczyk, W. Skonieczna, B. Mrzygłód, U. Prahł and M. B. Jabłońska. “Fuzzy logic as a method of analysis of hot forging process of 80MnSi8-6 Steel.” *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 25 (2025). DOI: 10.1007/s43452-024-01088-0.
12. Nivolianiti, E., Y. L. Karnavas and J-F. Charpentier. “Fuzzy Logic-Based Energy Management Strategy for Hybrid Fuel Cell Electric Ship Power and Propulsion System.” *Journal of Marine Science and Engineering* 12.10 (2024). DOI: 10.3390/jmse12101813.
13. Wu, B., T. L. Yip, X. Yan and C. Guedes Soares. “Fuzzy logic based approach for ship-bridge collision alert system.” *Ocean Engineering* 187 (2019): 106152. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106152.

14. Nguyen, A-T., M. Sugeno et al. "Fuzzy Control Systems: Past, Present and Future." *IEEE Computational Intelligence Magazine* 14.1 (2019): 56–68. DOI: 10.1109/MCI.2018.2881644.
15. Galiullin, L. A. "Development of automated test system for diesel engines based on fuzzy logic." *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2016: 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911582.
16. Pedrycz, W. "Fuzzy Rule-Based Models." *An Introduction to Computing with Fuzzy Sets: Analysis, Design, and Applications*. Springer International Publishing, 2021: 197–224. DOI: 10.1007/978-3-030-52800-3_13.
17. Babichev, S., O. Zaitsev, O. Khamula and L. Strielkovskaya. "Development of a Fuzzy Inference Model for the Management of a Marine Engine." *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making*. Springer International Publishing, 2021: 331–340. DOI: 10.1007/978-3-030-54215-3_21.
18. Sharma, A., A. Tselykh, E. Podoplelova and A. Tselykh. "Knowledge-oriented methodologies for causal inference relations using fuzzy cognitive maps: A systematic review." *Computers & Industrial Engineering* 171 (2022): 108500. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108500.
19. Tselykh, A., L. Tselykh, V. Vasilev and S. Barkovskii. "Expert System with Extended Knowledge Acquisition Module for Decision Making Support." *Proceedings of the Second International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'17)*. Springer International Publishing, 2018: 21–31. DOI: 10.1007/978-3-319-68324-9_3.
20. Polkovnikova, N. A. and V. M. Kureichik. "Hybrid Expert System Development Using Computer-Aided Software Engineering Tools." *Knowledge-Based Software Engineering*. Springer International Publishing, 2014: 433–445. DOI: 10.1007/978-3-319-11854-3_37.
21. Polkovnikova, N. A., and Kureichik, V. M. "Multiobjective Optimization of Fuel Supply Parameters for Main Marine Diesel Engines Based on Evolutionary Algorithms." *Creativity in Intelligent Technologies and Data Science: Proceedings of the International Conference (CIT&DS 2015)*. Springer International Publishing, 2015: 423–435. DOI: 10.1007/978-3-319-23766-4_34.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Polkovnikova, Natalia A. —
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Federal State-Financed Educational Institution
of Higher Education "Admiral Ushakov Maritime
State University"
93, Lenin's avenue, Novorossiysk, Krasnodar Krai,
353918, Russian Federation
e-mail: natalia-polkovnikova@mail.ru

Polkovnikov, Anatoly K. —
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Federal State-Financed Educational Institution
of Higher Education "Admiral Ushakov Maritime
State University"
93, Lenin's avenue, Novorossiysk, Krasnodar Krai,
353918, Russian Federation
e-mail: polkov5@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Полковникова Наталья Анатольевна —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Государственный морской
университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»
353918, Российская Федерация,
Краснодарский край, г. Новороссийск,
пр. Ленина, 93
e-mail: natalia-polkovnikova@mail.ru

Полковников Анатолий Карпович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Государственный морской
университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»
353918, Российская Федерация,
Краснодарский край, г. Новороссийск,
пр. Ленина, 93
e-mail: polkov5@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02 февраля 2026 г.
Received: Feb 02, 2026

Научное издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Том 18. № 4

2026 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *О. В. Пугачева, М. В. Смирнова*

Подписано в печать 28.08.26. Дата выхода в свет 31.08.26
Формат 60×90/8. Усл. печ. л. 26,75.
Тираж 500 (первый завод 30) экз. Свободная цена. Заказ № 416/26

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

Издательство ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, Межевой канал, 2

Отпечатано на полиграфической базе издательства ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, Межевой канал, 2