

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

**WATER TRANSPORT OPERATION, WATERWAYS
COMMUNICATONS AND HYDROGRAPHY**

УДК 656.61.052

DOI: 10.37890/jwt.vi85.644

Концепция навигационного поля

С.В. Ермаков

ORCID: 0009-0009-7814-8877

Е.В. Мулина

ORCID 0009-0002-3630-1609

Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия

Аннотация. Настоящая работа посвящена решению проблемы выбора траектории движения морского автономного надводного судна (МАНС) без участия человека. Кратко представлены и проанализированы результаты уже выполненных к настоящему времени научных работ, касающихся объекта исследования. Показано, что на текущий момент времени общепринятых, надёжных алгоритмов, методик, методов, обеспечивающих самостоятельную навигацию автономных судов, не существует, а соответствующий инструментарий пилотных проектов и концептов требует совершенствования, доработки и длительных испытаний (апробирования).

Предлагается в основу инновационного метода выбора траектории движения автономным судном положить представленную в работе концепцию навигационного поля, которая при своём дальнейшем развитии может трансформироваться в полноценную теорию навигационного поля. На первом этапе обоснования концепции была сформирована её терминологическая основа, которая кроме термина «навигационное поле» включила и ряд других терминов с их определениями, а именно: навигационное пространство, навигационная среда, аварийный потенциал, напряжённость навигационного поля и пр. Далее обоснованы классификации навигационного поля по различным критериям, согласно которым поле может быть первичным или вторичным, глобальным, рейсовым или локальным, текущим или прогностическим. За полевую характеристику, описывающую навигационное поле, принят аварийный потенциал – скалярная величина, определяемая условиями плавания и характеристиками судна и показывающая, насколько опасно плавание судна в конкретной точке навигационного пространства в определённый момент времени. Обоснованная концепция навигационного поля позволяет следующим образом сформулировать общее правило выбора МАНС траектории движения: судно будет стремиться изменить курс таким образом, чтобы оказаться в точке навигационного пространства, по отношению к которой уменьшение аварийного потенциала будет максимальным. В заключение поставлены задачи для дальнейшего исследования, итоговая цель которого – метод выбора морским автономным надводным судном траектории и скорости движения в различных условиях плавания.

Ключевые слова: навигационное пространство, навигационное поле, морские автономные надводные суда, траектория движения.

Navigation field concept

Sergey V. Ermakov

ORCID: 0009-0009-7814-8877

Elena V. Mulina

ORCID 0009-0002-3630-1609

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

Abstract. This work is devoted to solving the problem of choosing the trajectory of a Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) without human intervention. The results of scientific works, concerning the object of study that have already been carried out to date are briefly presented and analyzed. It is shown that at the current moment of time generally accepted, reliable algorithms, techniques, methods that provide independent navigation of autonomous ships do not exist, and the corresponding tools for pilot projects and concepts require improvement and long-term testing. An innovative method for choosing the trajectory of an autonomous ship is proposed to be based on the concept of the navigation field presented in the paper. At the first stage of the justification of the concept, its terminological basis was formed. In addition to the term “navigation field”, it included a number of other terms with their definitions.

After the formation of the terminological basis of the study, the classifications of the navigation field were substantiated. According to these classifications, the field can be primary or secondary, global, trip or local, current or predictive. The emergency potential as the field characteristic describing the navigation field is taken. The emergency potential is a scalar value determined by the navigation conditions and the characteristics of the ship and showing how dangerous the navigation of the ship is at a particular point in the navigational space. The justified concept of the navigation field makes it possible to formulate the general rule for choosing the trajectory of motion by an autonomous ship as follows: MASS will seek to change course in such a way as to be the point of the navigation space, in relation to which the reduction in emergency potential will be maximum. At the end of the study, tasks were set for further research, the final goal of which is a method for choosing a trajectory and speed of movement in various navigation conditions by a marine autonomous surface ship.

Keywords: navigation space, navigation field, Maritime Autonomous Surface Ships, movement trajectory.

Введение

Морские автономные надводные суда (МАНС) сейчас являются признанным горизонтом развития морского флота, целью большинства научных исследований в морской индустрии и предметом дискуссий и нормативно-правового регулирования как на национальном, так и на международном уровнях. Однако автономное судоходство и, в частности, технологии автономного судовождения в настоящее время находятся на начальных этапах своей эволюции, характеризующихся наличием множества пока нерешённых организационных, технических и правовых проблем и трудно формализуемых задач [1, 2]. К числу последних относится и задача построения (выбора) морским автономным надводным судном траектории своего движения и определения режима движения по этой траектории. Следует предположить, что решение этой задачи будет иметь различный характер и уровень сложности в зависимости от условий плавания МАНС. Так, в стеснённых условиях при совместном плавании с другими судами и с наличием очевидной необходимости в периодическом маневрировании для безопасного расхождения с ними задача построения и реализации траектории будет много сложнее, чем при одиночном плавании в открытом море.

К настоящему времени опубликовано большое количество научных трудов, имеющих отношение к движению и маневрированию автономных судов. Так,

концепция искусственных потенциальных полей – APFs (Artificial Potential Fields) авторами работы [3] положена в основу судовой системы, которая позволяет обеспечивать безопасное расхождение как с надводными навигационными опасностями, т.е. статическими препятствиями, так и с другими судами, являющимися препятствиями динамическими. В статье [4] рассматривается похожий способ маневрирования МАНС. Этот способ основан на векторных полях обхода статического препятствия и на «отталкивающем» векторном поле. Алгоритм оптимизации муравьиной колонии АСО (Ant Colony Optimisation) с целью предотвращения столкновения судов при расхождении предлагают использовать в МАНС авторы работы [5]. Модернизированный метод скоростных препятствий VO (Velocity Obstacles) предложен для решения рассматриваемой проблемы в исследовании [6]. Нейронные сети, интервальное программирование, нечёткая логика – эти инструменты положены в основу алгоритмов расхождения судов в статьях [7-10]. В работах [11-18] рассматривается автоматизированное расхождение уже не с единичным судном, а с группой судов. Наиболее полный обзор и анализ большинства существующих подходов приведён в [19].

В итоге становится очевидным, что результаты многочисленных интенсивных исследований, направленных на обеспечение МАНС алгоритмами выбора траектории, уже сформировали некоторую жизнеспособную методологию. Вместе с тем ни один из полученных результатов, в том числе и те, что уже реализованы в концептах и пилотных проектах МАНС, нельзя пока считать приемлемыми для широкого применения на практике.

В настоящей работе приводится обоснование не самого метода выбора МАНС траектории движения как такового, а некоторых базовых для его разработки теоретических положений, объединённых в концепцию, названную концепцией навигационного поля. За основной же научный метод в исследовании принята аналогия, а, точнее, аналогия с теорией электростатического поля. Подобный подход к изучению искусственных (в смысле созданных человеком) объектов, сущностей, материй, систем с использованием известных естественных (природных) законов не является новацией [20].

Следует заметить, что объектом настоящего исследования являются только морские автономные надводные суда, которые по классификации Международной морской организации относятся к МАНС четвёртой степени автономности, предполагающей полное отсутствие участия человека в управлении судна и других операциях, подлежащих выполнению при его функционировании.

Основная терминология теории навигационного поля

Обязательным условием любого научного исследования является наличие системы согласованных понятий, отражающих его предметную область и состоящая из специальных терминов, которые находятся в строгих терминологических отношениях [21, 22]. Вместе с тем, эта система, т.е. терминологическая база исследования, не является некоей формируемой единожды и неподлежащей изменению, незыблемой конструкцией. Наоборот, система терминов должна быть динамична и способна оперативно адаптироваться к новым промежуточным результатам того исследования, для которого она была изначально создана.

Очевидно, что ядром терминологической базы настоящего исследования, его основным элементом является термин «навигационное поле». Формирующий и более общий для него термин «поле» лежит в основе многих систем специальных или общих терминов, используемых в различных отраслях наук. В нашем случае под навигационным полем будем понимать сложное нестационарное и непрерывное информационное поле, представляющее собой результат суперпозиции элементарных информационных полей, порождаемых реальными, значимыми для безопасности плавания условиями и явлениями, и определяющее оптимальные траекторию и

скорость движения судна. Здесь необходимо разделять понятия «навигационное поле» и «навигационное пространство». Последнее определяется только совокупностью точек со своими координатами, а навигационное поле привязывает к каждой точке навигационного пространства иную, чем координаты информацию (является информационным описанием навигационного пространства).

Навигационное поле можно классифицировать по следующим признакам (рис. 1):

- по временному признаку: на текущее и прогностическое;
- по наличию в поле нашего судна: на первичное и вторичное;
- по пространственному признаку: на глобальное, рейсовое и локальное;
- по наличию в поле иных судов: невозмущённое и возмущённое.

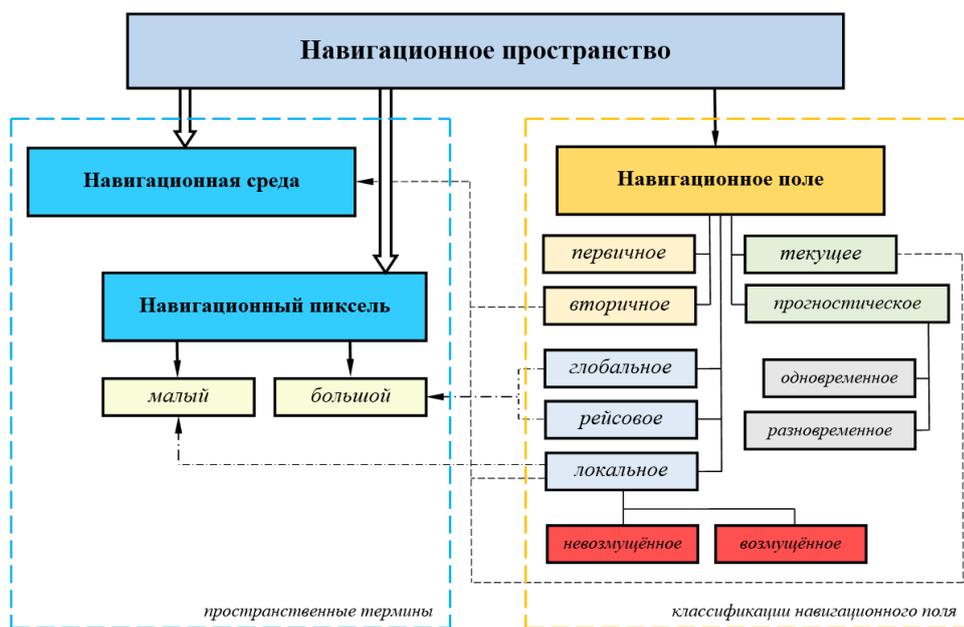


Рис. 1. Терминология концепции навигационного поля

Текущее навигационное поле вне зависимости от размеров навигационного пространства, которое оно описывает, по сути, это навигационное поле, имеющее место быть на момент наблюдения. В случае же, если этот момент отсрочен в будущее, навигационное поле уже следует считать прогностическим. При этом не обязательно для всего описываемого навигационного пространства прогностическое навигационное поле должно быть привязано к одному моменту времени (то есть быть одновременным). В частности, для планирования перехода большой интерес вызывают моменты времени нахождения судна в той или иной точке навигационного пространства так, как это предусмотрено планом перехода. Соответственно и прогностическое навигационное поле для этих точек (частей акватории) должно определяться моментом времени нахождения там судна. Подобное прогностическое навигационное поле будет являться уже разновременным.

Для понимания различия между первичным и вторичным навигационным полем обратимся к элементарному, составляющему навигационное, полю волнения. Если в первичном навигационном поле основной информацией о волнении будет являться его сила и направление, то во вторичном – вместе с силой будет иметь значение курсовой угол волнения. Таким образом, можно заключить, что вторичное навигационное поле образуется из первичного фильтрацией судна, т.е. преобразованием первичных

«прямых» характеристик элементарных полей во вторичные, значимые для навигационной безопасности характеристики.

Под локальным (местным, ограниченным, топическим) навигационным полем следует понимать навигационное поле, в котором судно, осуществляя навигацию, находится непосредственно в текущий момент времени. Границы такого навигационного поля (навигационного пространства) могут определяться проливом, каналом, дальностью видимости горизонта, дальностью действия радиолокационной станции, используемой шкалой радиолокатора и т.п.

В свою очередь, рейсовое навигационное поле описывает навигационное пространство, в любой точке которого может появиться судно, выполняющее конкретное рейсовое задание (конкретный переход). Очевидно, что размеры такого поля могут отличаться в разы. В случае, например, паромной переправы Ньюхейвен – Дьепп, рейсовое навигационное поле будет, по сути, локальным. С другой стороны, переход Ливерпуль – Монтевидео определяет размеры рейсового поля, приближающие его к глобальному, т.е. такому навигационному полю, которое охватывает все возможные судоходные пути мира.

Кроме навигационного поля и навигационного пространства представляемая концепция включает ещё два понятия, первое из которых – навигационный пиксель.

Навигационный пиксель – это часть навигационного пространства, имеющая, как правило, форму квадрата размером не менее длины судна, в пределах которого навигационное поле можно считать постоянным. Размер навигационного пикселя определяется условиями плавания и является ли поле локальным, рейсовым или глобальным.

В свою очередь, вторичное локальное навигационное поле также, как и описываемую им часть навигационного пространства при необходимости можно называть навигационной средой. Схематически терминология концепции навигационного поля представлена на рис. 1.

Основная полевая и вспомогательные характеристики навигационного поля

Информационное поле характеризуется функциональной величиной, характеризующей количественно точки пространства [23].

Описательной характеристикой информационного поля, отображающего свойства какого-либо пространства, является функциональная величина, зависящая от координат точки пространства (в случае стационарных полей) и времени (в случае полей нестационарных), называемая полевой переменной. В качестве полевой переменной для навигационного поля (причём переменной единственной) введём в терминологическую систему и примем аварийный потенциал p .

Аварийный потенциал – это скалярная характеристика навигационного поля, которая показывает, насколько опасно плавание конкретного судна в конкретной точке навигационного пространства (навигационного поля):

$$p = \frac{S_N}{r_{No}}, \quad (1)$$

где S_N – уровень навигационной опасности – скалярная величина, количественно определяющая уровень опасности плавания судна в конкретной точке навигационного поля (безотносительно к конкретному судну); r_{No} – навигационный ресурс [24] – скалярная величина, количественно и комплексно описывающая текущую динамику движения конкретного судна и его маневренные характеристики в контексте навигационного поля.

Таким образом очевидно, что чем выше аварийный потенциал, тем более опасной является навигация судна в конкретной точке поля.

Понятие аварийного потенциала, так же как и формула (1) восходят к теории электростатического поля и таким понятиям как электрический потенциал ϕ , заряд q и

потенциальная энергия заряда W . Так, электрический потенциал определяется формулой:

$$\varphi = \frac{W}{q}, \quad (2)$$

т.е. потенциал – это характеристика электрического поля, которая показывает, какой потенциальной энергией обладает единичный электрический заряд, помещённый в поле.

Здесь резонно скорректировать определение аварийного потенциала, приведя его к следующему: аварийный потенциал – это характеристика навигационного поля, которая показывает, насколько опасна навигация судна в данной точке (пикселе) поля судном, которое обладает единичным навигационным ресурсом.

Для обеспечения возможности более наглядного описания навигационного поля в дополнение к аварийному потенциалу введём ещё несколько следующих, производных от него полевых характеристик.

Теоретический навигационный оптимум $NO_T = p_{min T}$ – это наименьшее из всех возможных значение аварийного потенциала, который только может быть получен при его расчёте (определении) по предназначенной для этого методике (подлежит обоснованию). Здесь предполагается, что аварийный потенциал также, как вероятность навигационной аварии или инцидента, никогда не может быть равен нулю. Однако методика вычисления аварийного потенциала может не дать возможности определить точное значение теоретического оптимума, и он будет представлять ещё большую абстракцию, чем сам аварийный потенциал. По этой причине более интересен будет не теоретический, а практический навигационный оптимум, т.е. минимум, переделаемый не методологически, а апостериорно.

Практический навигационный оптимум $NO_P = p_{min P}$ – это наименьшее из всех возможных значений аварийного потенциала, который когда-либо наблюдался в характеризующейся точке навигационного поля. Иными словами, практический оптимум определяется наилучшей совокупностью условий плавания из всех, что имели место быть за всю историю наблюдений на оцениваемом навигационном пространстве (применительно к конкретной точке навигационного поля).

Теоретический и практический навигационные оптимумы являются, по сути, двумя вариантами нормирования аварийного потенциала (представляют собой «абсолютные потенциальные нули»).

Схождение оптимумов $CNO = NO_P - NO_T$ – это разность между практическим и теоретическим навигационными оптимумами.

Практический навигационный оптимум n -процентной обеспеченности $NO_{Pn} = p_n$ – это такое значение, которое не превышал аварийный потенциал суммарно в течение $n\%$ времени наблюдения.

Аналогичным образом определяются теоретический и практический максимумы аварийного потенциала $M_P = p_{max P}$ и $M_T = p_{max T}$, а также практический максимум m -процентной обеспеченности $M_{Pm} = p_m$.

Редукция оптимальности $R = p_{тек} - p_{min P} = p_{тек} - NO_P$ – это отстояние текущего (или прогнозного) значения аварийного потенциала данной точки навигационного поля от практического навигационного оптимума этой точки.

Относительная редукция оптимальности

$$RR = \frac{(p_{тек} - p_n)}{(p_m - p_n)} = \frac{(p_{тек} - NO_P)}{(M_{Pm} - NO_{Pn})}$$

– это отношение редукции оптимальности к величине интервала значений аварийного потенциала, заключенного между значениями практического навигационного оптимума n -процентной обеспеченности и практического максимума m -процентной обеспеченности, т.е. интервала $(NO_{Pn}; M_{Pm})$. Очевидно, что эта

характеристика наглядней всего отражает уровень аварийного потенциала навигационного поля в данной его точке.

Использование предложенных вспомогательных характеристик навигационного поля позволит проводить глубокий анализ временной и пространственной динамики навигационного поля и принимать её к учёту как при поддержке принятия решения судоводителем в случае пилотируемых судов, так и в алгоритме определения траектории движения морским автономным надводным судном.

Результаты

Примем, что в границах одного пикселя аварийный потенциал всех точек одинаков и равен аварийному потенциалу точки навигационного поля, являющейся центром пикселя.

Оптимальная траектория движения судна тогда будет определяться направлением градиента аварийного потенциала, т.е. направлением между центром текущего пикселя и таким центром одного из смежных пикселей, в отношении которого уменьшение навигационного потенциала из расчёта на единицу расстояния при перемещении в этот центр судна будет максимальным. Иными словами, оптимальная траектория движения судна будет определяться направлением вектора напряженности навигационного поля:

$$\vec{E}_0 = -\text{grad } p_0. \quad (3)$$

Здесь необходимо и уместно ещё раз вернуться к вопросу аналогии, причём не только с теорией электростатического поля, но и с теорией поля гравитационного. Несмотря на значительное отличие в самой природе электростатического и гравитационного полей, классические математические модели, лежащие в основе их теорий во многом схожи, а местами и тождественны.

Именно по этой причине, т.е. чтобы соблюсти сходство (аналогию) с электростатическим полем, за основную полевую характеристику навигационного поля принята «негативная» величина в том смысле, что используется аварийный потенциал, определяющий опасность плавания, а не, например, навигационный потенциал, связанный с безопасностью.

Навигационное поле и движение в нём судна схематично и наглядно представлено на рис. 2. Здесь навигационная среда судна разделена на пиксели, каждый из которых имеет свой аварийный потенциал. Величина аварийного потенциала оценивается цветовой шкалой (девять цветов).

При совместном плавании каждое судно-цель будет являться источником возмущающего поля с аварийным потенциалом, определяемым как

$$p_B = k \frac{r_{NB}}{D}, \quad (4)$$

где r_{NB} – навигационный ресурс встречного судна (судна-цели), D – расстояние между судном-целью и точкой (центром пикселя) навигационного поля, для которого определяется аварийный потенциал.

Коэффициент k , входящий в формулу (4), имеет смысл аварийного потенциала возмущающего поля, создаваемого встречным судном с $r_{NB} = 1$ на расстоянии 1 миля от него.

При наличии возмущающего (возмущающих) полей результирующий потенциал для любой точки возмущённого аварийного поля в соответствии с принципом суперпозиции будет определяться алгебраической суммой потенциалов невозмущенного и возмущающих полей, созданных каждым судном-целью в отдельности.

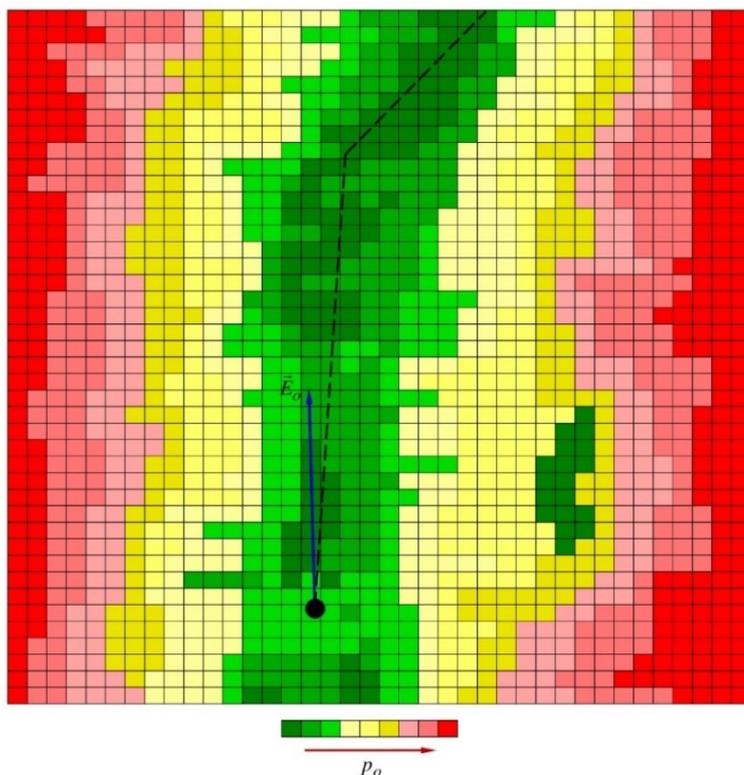


Рис. 2. Навигационное поле судна при одиночном плавании

Динамика движения нашего и встречного судов в локальном навигационном поле такова, что возмущённое навигационное поле будет меняться очень интенсивно. Для выработки траектории движения судна в такой ситуации необходим постоянный анализ прогностического разновременного навигационного поля (т.е. совокупности одновременных полей на последовательные промежутки времени, которые далее будут обозначаться термином прогностические навигационные кадры или просто навигационные кадры). Последовательность навигационных кадров даёт возможность автономному судну оценить ближайшую динамику навигационного поля и выбрать манёвр на расхождение.

На рис. 3-5 схематично представлены три навигационных кадра разновременного прогностического навигационного поля.

Обсуждение

Очевидно, что сформулированное выше формальное правило выбора и реализации МАНС своей траектории должно быть дополнено рядом ограничений. В первую очередь для всех возможных в конкретный момент времени направлений векторов напряжённости следует установить границы сектора таким образом, чтобы движение судна по любому из направлений было физически осуществимо.

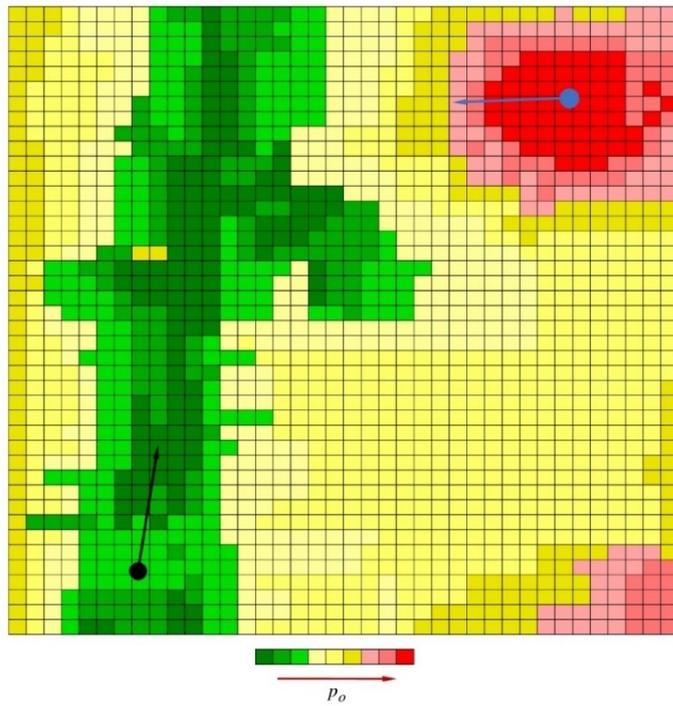


Рис. 3. Расхождение со встречным судном в навигационном поле (навигационный кадр nf 1)

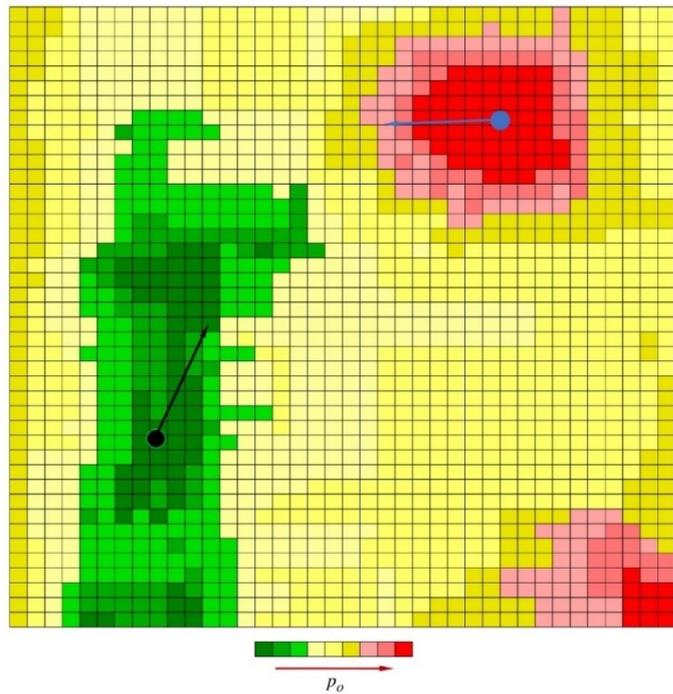


Рис. 4. Расхождение со встречным судном в навигационном поле (навигационный кадр nf 2)

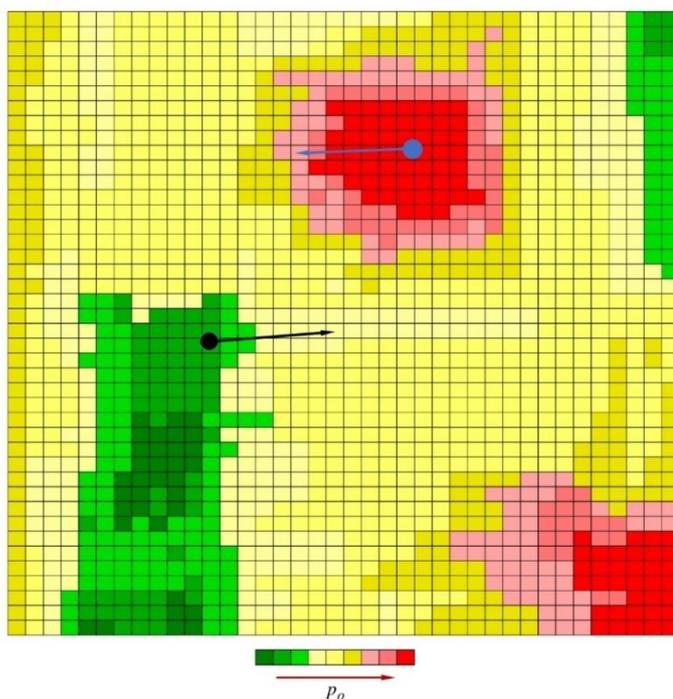


Рис. 5. Расхождение со встречным судном в навигационном поле (навигационный кадр pf 3)

Второе очевидное ограничение является тривиальным, существующим в современных авторулевых и называемое чувствительностью. Во избежание износа и поломки рулевой машины изменение траектории движения МАНС должно происходить не одновременно с изменением направления вектора напряженности, а лишь тогда, когда вектор движения судна достигнет заданного угла (чувствительности) относительно вектора напряжённости.

Очевидно, что количество ограничений и условий должно быть много больше представленного, и их обоснование является одной из дальнейших задач исследования.

Для первичного понимания физического смысла величины S_N , а также для расчёта этой величины в первом приближении, можно использовать схожую по содержанию и назначению величину – сложность навигационной ситуации (CNS), как она описана в [25-27]. Величина CNS является величиной, агрегированной по отношению к семнадцати компонентам навигационной ситуации, среди которых глубина, характеристики ветра, волнения и течения, видимость и т.д., и дифференцированной по акваториям плавания – открытое море, прибрежное плавание, стеснённые воды. Алгоритм расчёта заключается в переводе значений характеристик компонент навигационной ситуации, представленных в традиционном выражении, в значения расчётных коэффициентов K_i и дальнейшее вычисление CNS по формуле:

$$CNS = 1 - \prod_{i=1}^{17} (1 - K_i).$$

Полученное в результате значение не может быть меньше нуля и больше 1.

Одним из направлений дальнейшего развития концепции навигационного поля видится её интеграция с концепцией цифровых двойников. Под цифровым двойником судна здесь понимается такой набор информации о МАНС, как физическом объекте, который позволит делать любые выводы о текущем и будущем функционировании самого объекта без обращения к нему. В нашем случае, т.е. в случае выбора и реализации МАНС траектории своего движения, посредством цифрового двойника

можно подобрать такое управляющее воздействие, которое практически безошибочно обеспечит движение по требуемой траектории. Таким образом, совмещение полевой и двойниковой концепций будет иметь большой синергетический эффект. Следует также заметить, что если в современных условиях запись цифрового двойника судна происходит во время его эксплуатации, то с развитием автономного судоходства МАНС будут с самого начала обеспечены своими цифровыми двойниками (причём не только цифровыми двойниками навигации). Более того, цифровые двойники всех судов (и не только судов-прототипов) возможно будут объединены в единый цифровой двойник всего мирового флота.

Заключение

Морские автономные надводные суда хотя и не являются панацеей от аварийности, но своим появлением и развитием в составе мирового флота количество человеческих жертв они очевидно устремят к нулю. В связи с МАНС не стоит также забывать и экономический аспект их развития. Автономный флот сделает более выгодными перевозки морем. Вместе с тем, готовых к промышленной эксплуатации решений пока ещё не существует, а эволюция морских автономных надводных судов находится на стадии опытных образцов и интенсивных теоретических и прикладных исследований. В соответствии с периодизацией, представленной в [28], можно сказать, что МАНС сейчас находится на пересечении периода теорий и концепций и периода концептов и пилотных проектов.

Одной из текущих ключевых задач исследований в области МАНС является задача выбора и реализации траектории движения автономного судна. Полученные же в настоящей работе результаты – концепция навигационного поля и формальное правило определения направления движения МАНС по направлению напряжённости поля (по градиенту аварийного потенциала) – при дальнейшем их развитии могут привести если не к общему, то к частному решению указанной ключевой задачи.

В рамках продолжения исследования видится в первую очередь необходимым разработка методик определения уровня навигационной опасности, навигационного ресурса, решение задачи установления промежутков времени, которые необходимо принимать во внимание при определении оптимумов и максимумов, а также уровней обеспеченности m и n и т.д. Для успешного решения этих и других задач функционирования МАНС современная наука предоставляет разнообразный эффективный инструментарий, в числе которого, например, нечёткая логика и нейросетевые технологии.

Список литературы

1. Ермаков С.В., Малинин Н.Ж., Мулина Е.В. Морские автономные надводные суда: проблемы терминологии, классификации и нормативно-правового регулирования // Новые стратегии и технологии морского судоходства и промысла: Материалы Первой национальной научно-технической конференции, Калининград, 25 февраля 2022 года / Отв. за выпуск Т.С. Станкевич. Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. С. 81-85.
2. Коротков В.Ю. Развитие технологии морских автономных надводных судов [Электронный ресурс]. – URL: <https://kmu.itmo.ru/file/download/application/4149> (дата обращения: 24.09.2025).
3. Naeem W., Oliveira Henrique S.C., AbuTair M. Collision avoidance of maritime vessels // Navigation and Control of Autonomous Marine Vehicles. 2019. Pp. 61-84. DOI: 10.1049/PBTR011E_ch3.
4. Дыда А.А., Пушкарев И.И., Чумакова К.Н. Алгоритм обхода статических препятствий для безэкипажного судна // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2021. Т. 13. № 3. С. 307-315. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-307-315.

5. Lazarowska A. Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimisation // *The Journal of Navigation*. 2015. Vol. 68. Pp. 291-307. DOI: 10.1017/S0373463314000708.
6. Kuwata Y., Wolf M.T., Zarzhitsky D. Safe Maritime Navigation with COLREGS Using Velocity Obstacles // 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2011. Pp. 4728-4734. DOI: 10.1109/IROS.2011.6094677
7. Wang C., Zhang X., Cong L., Li J., Zhang J. Research on intelligent collision avoidance decision-making of unmanned ship in unknown environments // *Evolving Systems*. 2019. Vol. 10. Is. 4. Pp. 649-658. DOI: 10.1007/s12530-018-9253-9.
8. Седова Н.А., Седов В.А. Метод расхождения морских судов в зоне чрезмерного сближения на основе нейронечетких технологий // *Известия Юго-Западного государственного университета*. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8. № 4 (29). С. 53-62.
9. Benjamin M.R., Curcio J.A., Leonard J.J., Newman P.M. Navigation of unmanned marine vehicles in accordance with the rules of the road // *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotic and Automation, 2006*. IEEE, 2006. Pp. 3581-3587.
10. Perera L.P., Carvalho J.P., Guedes Soares C. Autonomous guidance and navigation based on the COLREGs rules and regulations of collision avoidance // *Proceedings of the international workshop advanced ship design for pollution prevention*. London, UK: Taylor & Francis Group, 2010. Pp. 205-216.
11. Смоленцев С.В., Сазонов А.Е., Искандеров Ю.М. Кооперативное маневрирование безэкипажных судов для безопасного расхождения в море // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2018. Т. 10. № 4. С. 687-695. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695.
12. Rego F.C., Hung N.T., Jones C.N., Pascoal A.M., Aguiar A.P., Sharma S., Subudhi B. Cooperative path-following control with logic-based communications: Theory and practice // *Navigation and Control of Autonomous Marine Vehicles*. 2019. Pp. 187-224. DOI: 10.1049/PBTR011E_ch8.
13. Shen H., Hashimoto H., Matsuda A., Taniguchi Y., Terada D., Guo C. Automatic collision avoidance of multiple ships based on deep Q-learning // *Applied Ocean Research*. 2019. Vol. 86. Pp. 268-288. DOI: 10.1016/j.apor.2019.02.020.
14. Hu Y., Zhang A., Tian W., Zhang J., Hou Z. Multi-ship collision avoidance decision-making based on collision risk index // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8. Is. 9. Pp. 640. DOI: 10.3390/jmse8090640.
15. Sawada R., Sato K., Majima T. Automatic ship collision avoidance using deep reinforcement learning with LSTM in continuous action spaces // *Journal of Marine Science and Technology*. 2020. Pp. 1-16. DOI: 10.1007/s00773-020-00755-0.
16. Li Y., Zheng J. Deep learning structure for collision avoidance planning of unmanned surface vessel // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2021. Vol. 235. Is. 2. Pp. 511-520. DOI: 10.1177/1475090220970102.
17. Guo S., Zhang X., Zheng Y., Du Y. An autonomous path planning model for unmanned ships based on deep reinforcement learning // *Sensors*. 2020. Vol. 20. Is. 2. Pp. 426. DOI: 10.3390/s20020426.
18. Xie S., Chu X., Zheng M., Liu C. A composite learning method for multi-ship collision avoidance based on reinforcement learning and inverse control // *Neurocomputing*. 2020. Vol. 411. Pp. 375-392. DOI: 10.1016/j.neucom.2020.05.089.
19. Триполец О.Ю. Обзор существующих методов расхождения безэкипажных судов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2021. Т. 13. № 4. С. 480-495. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-480-49/
20. Иванов Д.С., Брюханов Д.А. Обзор направлений развития техноценоза // *Вестник науки*. 2022. Т. 4. № 11(56). С. 297-303.
21. Тихонов А.Н., Иванников А.Д., Цветков В.Я. Терминологические отношения // *Фундаментальные исследования*. 2009. № 5. С. 146-148.
22. Ожерельева Т.А. Об отношении понятий информационное пространство, информационное поле, информационная среда и семантическое окружение // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2014. № 10. С. 21-24.

23. Tsvetkov V.Ya. Information field // *Life Science Journal*. 2014. № 11(5). Pp. 551-554.
24. Ермаков С.В., Мулина Е.В. Первичная математическая формализация понятия «навигационный ресурс» в контексте концепции навигационного поля // *Эксплуатация морского транспорта*. 2025. № 2(115). С. 10-15.
25. Ермаков С.В., Бондарев В.А. Управление риском чрезвычайных ситуаций на основе прогнозирования и минимизации влияния человеческого фактора на навигационную безопасность плавания судна // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2017. № 5. С. 66-73.
26. Ермаков С.В. Превентивное регулирование человеческого фактора в морском судождении // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2016. № 5(39). С. 39-50. DOI 10.21821/2309-5180-2016-8-5-39-50.
27. Ермаков С.В. Метод формализованной оценки сложности навигационной ситуации // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2014. № 4(26). С. 26-31.
28. Ермаков С.В., Малинин Н.Ж., Мулина Е.В. Ретроспективная и перспективная периодизация развития технологий автоматизации процессов судождения // *Новые стратегии и технологии морского судоходства и промысла. Материалы III национальной научно-технической конференции на базе ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет*. 28 марта 2024 года. Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2024. С. 41-45.

References

1. Ermakov S.V., Malinin N.Zh., Mulina E.V. Morskie avtonomnye nadvodnye suda: problemy terminologii, klassifikacii i normativno-pravovogo regulirovaniya [Maritime Autonomous Surface Ships: problems of terminology, classification and legal regulation] // *Novye strategii i tehnologii morskogo sudohodstva i promysla: Materialy Pervoj nacional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Kaliningrad, 25 fevralja 2022 goda / Otv. za vypusk T.S. Stankevich*. Kaliningrad: Izd-vo BGARF FGBOU VO «KGTU», 2022. (In Russ). Pp. 81-85.
2. Korotkov V.Ju. Razvitie tehnologii morskikh avtonomnykh nadvodnykh sudov. URL: <https://kmu.itmo.ru/file/download/application/4149> (24.09.2025).
3. Naeem W., Oliveira Henrique S.C., AbuTair M. Collision avoidance of maritime vessels // *Navigation and Control of Autonomous Marine Vehicles*. 2019. Pp. 61-84. DOI: 10.1049/PBTR011E_ch3.
4. Dyda A.A., Pushkarev I.I., Chumakova K.N. Algoritm obhoda staticheskikh prepjatstvij dlja bezjeki pazhnogo sudna [Static obstacles avoidance algorithm for unnamed ship] // *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 2021. Vol. 13. № 3. (In Russ). Pp. 307-315. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-307-315.
5. Lazarowska A. Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimisation // *The Journal of Navigation*. 2015. Vol. 68. Pp. 291-307. DOI: 10.1017/S0373463314000708.
6. Kuwata Y., Wolf M.T., Zarzhitsky D. Safe Maritime Navigation with COLREGS Using Velocity Obstacles // *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2011. Pp. 4728-4734. DOI: 10.1109/IROS.2011.6094677
7. Wang C., Zhang X., Cong L., Li J., Zhang J. Research on intelligent collision avoidance decision-making of unmanned ship in unknown environments // *Evolving Systems*. 2019. Vol. 10. Is. 4. Pp. 649-658. DOI: 10.1007/s12530-018-9253-9.
8. Sedova N.A., Sedov V.A. Metod rashozhdenija morskikh sudov v zone chrezmernogo sbliženija na osnove nejronechjotkih tehnologij [Ships Passing Method in the Heavy Traffic Zone on Neuro-Fuzzy Base] // *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika, informatika. Medicinskoje priborostroenie*. 2018. Vol. 8. № 4 (29). (In Russ). Pp. 53-62.
9. Benjamin M.R., Curcio J.A., Leonard J.J., Newman P.M. Navigation of unmanned marine vehicles in accordance with the rules of the road // *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotic and Automation, 2006*. IEEE, 2006. Pp. 3581-3587.
10. Perera L.P., Carvalho J.P., Guedes Soares C. Autonomous guidance and navigation based on the COLREGs rules and regulations of collision avoidance // *Proceedings of the*

- international workshop advanced ship design for pollution prevention. London, UK: Taylor & Francis Group, 2010. Pp. 205-216.
11. Smolencev S.V., Sazonov A.E., Iskanderov Ju.M. Kooperativnoe manevrirovanie bezjkipazhnyh sudov dlja bezopasnogo rashozhdenija v more [Cooperative maneuvering of unmanned ships for collision avoidance at sea] // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2018. Vol. 10. № 4. (In Russ). Pp. 687-695. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695.
 12. Rego F.C., Hung N.T., Jones C.N., Pascoal A.M., Aguiar A.P., Sharma S., Subudhi B. Cooperative path-following control with logic-based communications: Theory and practice // Navigation and Control of Autonomous Marine Vehicles. 2019. Pp. 187-224. DOI: 10.1049/PBTR011E_ch8.
 13. Shen H., Hashimoto H., Matsuda A., Taniguchi Y., Terada D., Guo C. Automatic collision avoidance of multiple ships based on deep Q-learning // Applied Ocean Research. 2019. Vol. 86. Pp. 268-288. DOI: 10.1016/j.apor.2019.02.020.
 14. Hu Y., Zhang A., Tian W., Zhang J., Hou Z. Multi-ship collision avoidance decision-making based on collision risk index // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 8. Is. 9. Pp. 640. DOI: 10.3390/jmse8090640.
 15. Sawada R., Sato K., Majima T. Automatic ship collision avoidance using deep reinforcement learning with LSTM in continuous action spaces // Journal of Marine Science and Technology. 2020. Pp. 1-16. DOI: 10.1007/s00773-020-00755-0.
 16. Li Y., Zheng J. Deep learning structure for collision avoidance planning of unmanned surface vessel // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Mari-time Environment. 2021. Vol. 235. Is. 2. Pp. 511-520. DOI: 10.1177/1475090220970102.
 17. Guo S., Zhang X., Zheng Y., Du Y. An autonomous path planning model for unmanned ships based on deep reinforcement learning // Sensors. 2020. Vol. 20. Is. 2. Pp. 426. DOI: 10.3390/s20020426.
 18. Xie S., Chu X., Zheng M., Liu C. A composite learning method for multi-ship collision avoidance based on reinforcement learning and inverse control // Neurocomputing. 2020. Vol. 411. Pp. 375-392. DOI: 10.1016/j.neucom.2020.05.089.
 19. Tripolec O.Ju. Obzor sushhestvujushih metodov rashozhdenija bezjkipazhnyh sudov [Overview of existing methods of autonomous vessels collision avoidance] // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2021. Vol. 13. № 4. (In Russ). Pp. 480-495. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-480-495.
 20. Ivanov D.S., Brjuhanov D.A. Obzor napravlenij razvitija tehnocenoza [Overview of the direction of technocenos development] // Vestnik nauki. 2022. T. 4. № 11(56). (In Russ). Pp. 297-303.
 21. Tihonov A.N., Ivannikov A.D., Cvetkov V.Ja. Terminologicheskie otnoshenija // Fundamental'nye issledovanija. 2009. № 5. (In Russ). Pp. 146-148.
 22. Ozherel'eva T.A. Ob otnoshenii ponjatij informacionnoe prostranstvo, informacionnoe pole, informacionnaja sreda i semanticheskoe okruzenie // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. 2014. № 10. (In Russ). Pp. 21-24.
 23. Tsvetkov V.Ya. Information field // Life Science Journal. 2014. № 11(5). Pp. 551-554.
 24. Ermakov S.V., Mulina E.V. Pervichnaja matematicheskaja formalizacija ponjatija «navigacionnyj resurs» v kontekste koncepcii navigacionnogo polja [Primary mathematical formalization of the «navigation resource» concept in the context of the navigation field theory] // Jekspluatacija morskogo transporta. 2025. № 2(115). (In Russ). Pp. 10-15.
 25. Ermakov S.V., Bondarev V.A. Upravlenie riskom chrezvychajnyh situacij na osnove prognozirovanija i minimizacii vlijanija chelovecheskogo faktora na navigacionnuju bezopasnost' plavanija sudna [Risk management of emergencies based on prediction and minimization of the influence of the human factor on navigational safety of the vessel] // Problemy bezopasnosti i chrezvychajnyh situacij. 2017. № 5. (In Russ). Pp. 10-15 66-73.
 26. Ermakov S.V. Preventivnoe regulirovanie chelovecheskogo faktora v morskome sudovozhdenii [Preventive regulation of the human factor in marine navigation] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2016. № 5(39). (In Russ). Pp. 39-50. DOI 10.21821/2309-5180-2016-8-5-39-50.
 27. Ermakov S.V. Metod formalizovannoj ocenki slozhnosti navigacionnoj situacii [Method of formalized assessment of complexity of navigational situation] // Vestnik gosudarstvennogo

universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2014. № 4(26). (In Russ). Pp. 26-31.

28. Ermakov S.V., Malinin N.Zh., Mulina E.V. Retrospektivnaja i perspektivnaja periodizacija razvitija tehnologij avtomatizacii processov sudovozhdenija [] // Novye strategii i tehnologii morskogo sudohodstva i promysla. Materialy III nacional'noj nauchno-tehnicheskoj konferencii na baze FGBOU VO «Kaliningradskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet. 28 marta 2024 goda. Kaliningrad: Izd-vo BGARF FGBOU VO «KGTU», 2024. (In Russ). Pp. 41-45.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ермаков Сергей Владимирович, к.т.н.,
доцент кафедры судовождения и безопасности
мореплавания, Калининградский
государственный технический университет
(ФГБОУ ВО «КГТУ»), 236029, г.
Калининград, ул. Молодёжная, 6, e-mail:
sv.ermakov@bgarf.ru

Sergey V. Ermakov, Ph.D. in Engineering
Science, Associate Professor of Department of
Navigation and Maritime Safety, Kaliningrad
State Technical University, 6, Molodeznaya
str., Kaliningrad, 236029

Мулина Елена Вадимовна, второй
помощник капитана УПС «Седов»,
Калининградский государственный
технический университет (ФГБОУ ВО
«КГТУ»), 236029, г. Калининград, ул.
Молодёжная, 6, e-mail: mulina409@gmail.com

Elena V. Mulina, Second Mate of STV
«Sedov», Kaliningrad State Technical
University, 6, Molodeznaya str., Kaliningrad,
236029

Статья поступила в редакцию 25.09.2025; принята к публикации 24.10.2025;
опубликована онлайн 20.12.2025. Received 25.09.2025; published online 20.12.2025.