

**ADAPTIVE DYNAMIC SAFETY DOMAIN
FOR DIFFERENT SAILING CONDITIONS****S. V. Smolentsev, A. E. Filyakov, D. V. Isakov**Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The problem of navigation safety is considered, in particular, the problem of developing an algorithm for an adaptive dynamic safety domain for various navigation conditions is investigated. The risk assessment of a ship approach situation is based on the safety domain as the minimum area around the ship into which an oncoming ship should not enter. Navigation conditions are considered in accordance with the rules of COLREG-72 for navigation of vessels with limited visibility and being in sight of each other. To solve this problem, the navigation areas are classified. For further analysis, a table for the conditions and areas of navigation to identify the shape of the domains is created. The hydro meteorological situation, which takes into account the navigation conditions, and as a consequence, the need to increase the size of the safety domain, is considered. Changes in the parameters and shape of ship safety domains for different navigation conditions have been identified. For each district and navigation conditions, an original configuration of the security domain is proposed. The dynamic changes of the domain during movement in traffic separation systems and channels are separately considered. Using an example, a situation when the bow of the domain crosses the dividing line, which can lead to the appearance of false dangerous targets, is simulated. To avoid such situations, a dynamic domain with a changing shape in the form of an ellipse for swimming in a traffic separation system and channels, taking into account sailing conditions with limited visibility and in sight of each other is proposed. For the calculation, an algorithm to determine the shape of the domain under different visibility conditions and navigation areas has been compiled. Calculations for the case when the vessel enters a turn in traffic separation systems and narrow spaces have been performed. The deformation of the domain during rotation is shown.

Keywords: ship security domain, navigation safety, visibility conditions, classification of navigation areas.

For citation:

Smolentsev, Sergey V., Alexey E. Filyakov, and Dmitry V. Isakov. "Adaptive dynamic safety domain for different sailing conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 932–940. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-932-940.

УДК 656.61.052: 658.011.56**АДАПТИВНЫЙ ДИНАМИЧЕСКИЙ ДОМЕН БЕЗОПАСНОСТИ
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПЛАВАНИЯ****С. В. Смоленцев, А. Е. Филяков, Д. В. Исаков**ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрена проблема безопасности мореплавания, в частности исследована задача по разработке алгоритма адаптивного динамического домена безопасности для различных условий плавания. Оценка опасности ситуации сближения судов строится на основе домена безопасности как минимальной области вокруг судна, в которую не должно заходить встречное судно. Были рассмотрены условия плавания в соответствии с правилами МППСС-72 плавания судов при ограниченной видимости и находящихся на виду друг у друга. Для решения данной задачи классифицированы районы плавания. Для дальнейшего анализа создана таблица по условиям и районам плавания для выявления формы доменов. Выполнен учет гидрометеорологической обстановки исходя из условий плавания, а также показана необходимость увеличения размера домена безопасности при ее ухудшении. Выявлены изменения параметров и формы судовых доменов безопасности для разных условий плавания. Для каждого района и условия плавания предложена оригинальная конфигурация домена безопасности. Отдельно рассмотрено динамическое изменение домена при движении в системах разделения движения и каналах. На примере промоделирована ситуация, когда носовая часть домена пересекает разделительную линию, что может приводить к появлению ложных опасных целей. Во избежание

подобных ситуаций предлагается динамический домен с изменяющейся формой в виде эллипса для плавания в системе разделения движения и каналах с учетом условий плавания при ограниченной видимости и на виду друг у друга. Для вычисления составлен алгоритм определения форм домена при различных условиях видимости и районов плавания. Выполнены расчеты для случая, когда судно входит в поворот в системах разделения движения и узкостях. Показана деформация домена при повороте.

Ключевые слова: судовой домен безопасности, проблема безопасности мореплавания, условия видимости, сближение судов, классификация районов плавания, моделирование ситуации.

Для цитирования:

Смоленцев С. В. Адаптивный динамический домен безопасности для различных условий плавания / С. В. Смоленцев, А. Е. Филяков, Д. В. Исаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 932–940. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-932-940.

Введение (Introduction)

Динамика роста морских перевозок и, как следствие, интенсивность движения в различных районах Мирового океана увеличивает риск опасных ситуаций и аварий. Как показывает практика, в основном нештатные ситуации возникают в зоне прибрежного плавания, на подходах к портам, в узкостях (каналах) [1]. В настоящее время для описания опасной зоны вокруг собственного судна используется *домен безопасности*. Формы и размеры таких доменов должны быть не постоянными, а зависеть от текущей навигационной обстановки [2].

Целью исследования данной проблемы является выявление новых моделей и методов адаптивного динамического судового домена безопасности для различных условий и районов плавания. Динамический домен служит сохранению заданного уровня безопасности мореплавания во избежание ложных определений опасных ситуаций.

Задачей предлагаемого исследования является разработка алгоритма адаптивного динамического домена безопасности для различных условий плавания. Для этого домена предлагается модель с разными формами для разных районов плавания. Такой подход в конфигурациях домена предоставляет более корректную оценку навигационной ситуации для данных условий плавания. Предложенная модель с различными формами домена безопасности является продолжением уже существующих доменов, рассмотренных в статье «Оценка степени опасности сближения на основе динамического судового домена» [1], и в то же время основана на новых подходах. Преимуществом рассматриваемого домена является его форма, изменяемая в зависимости от ситуации и района плавания.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для разработки алгоритма адаптивного динамического домена была предложена классификация районов плавания, приведенная на рис. 1: открытое море, система разделения движения, узкости, каналы.



Рис. 1. Классификация районов плавания

Кроме того, были рассмотрены различные условия видимости, которые должны оказывать влияние на оценку опасности сближения. В соответствии с МППСС-72 [3], разд. III «Плавание судов при ограниченной видимости», правило 19, а также правилами разд. II МППСС-72 «Плавание судов, находящихся на виду друг у друга» ограничениями видимости являются: туман, мгла, ливень. Таким образом, необходимо выделить условия плавания, в соответствии с правилом 19 и правилом 11 разд. II «Плавание судов, находящихся на виду друг у друга», приведенные в классификации на рис. 2.

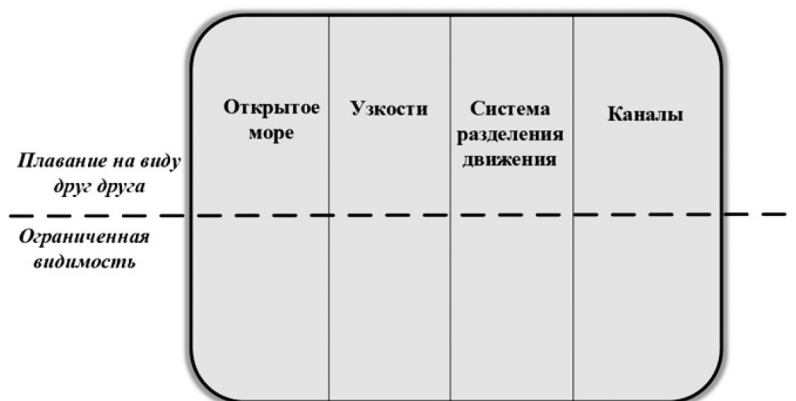


Рис. 2. Классификация условий плавания

При назначении домена безопасности для собственного судна необходимо осуществлять учет текущих навигационных особенностей района плавания. Таким образом, домен безопасности в условиях навигационных ограничений должен отличаться от домена безопасности в открытом море. В частности, необходимо учитывать минимальное расстояние до опасностей в данном районе, а также наличие зон регламентированного движения в системах разделения движения (СРД). При движении в узкости поперечный размер домена безопасности не должен превышать $\frac{1}{4}$ ширины узкости, в противном случае встречные суда будут ошибочно восприниматься как опасные. При движении по своей полосе в СРД поперечный размер домена безопасности не должен превышать $\frac{1}{2}$ ширины полосы движения, иначе встречные суда, идущие по своей полосе, будут ошибочно восприниматься как опасные [1].

Необходимо учитывать изменения условий видимости. В условиях ограниченной видимости следует увеличивать размеры домена безопасности. Предлагаемый домен безопасности создается для более адекватной оценки уровня навигационной ситуации при расхождении судов. Для него необходимо использовать модель с разными формами, предназначенными для разных районов плавания. Для этого нужно учитывать следующие факторы:

1. Правила МППСС.
2. Навигационные особенности района плавания.
3. Интенсивность мореплавания.
4. Гидрометеорологическую обстановку (в частности, видимость в зоне плавания).
5. Динамику судна, его управляемость.

На рис. 3–5 предложено три формы домена безопасности.

Примечание. Все рисунки, приведенные в работе, являются оригинальными.

Круговой домен безопасности. Этот домен безопасности, который представляет собой круг, рекомендуется для открытого моря. Предполагается, что в открытом море цели могут появляться с любого направления и быть опасны. Кроме того, использование данного домена позволит просто и быстро оценить степени опасности встречной цели. Параметром домена является радиус круга или CPA (Closest Point of Approach) [4].

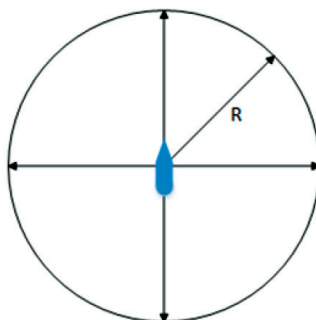


Рис. 3. Круговой домен безопасности

Домен безопасности в виде эллипса. Для плавания в СРД, и каналах предлагается использовать домен в виде эллипса. Предполагается, что цели могут двигаться справа и слева достаточно близко от собственного судна параллельными курсами, не представляя при этом опасности [5]. Опасности представляют только те цели, которые движутся по носу или корме. Поскольку цели по носу считаются более опасными, то центр эллипса может быть смещен к носу. Параметрами данного домена для эллипса без смещения являются значения a , b , со смещением вперед — значения a , b , c [1], [6].

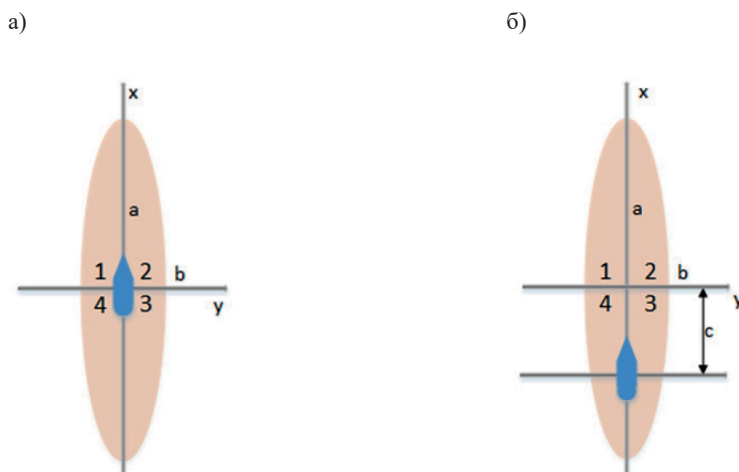


Рис. 4. Домен безопасности:
 a — в виде эллипса; b — в виде эллипса со смещением центра

Комплексный домен безопасности. Данный домен предполагает разные степени опасности целей для различных курсовых углов. В частности, цели на кормовых курсовых углах и траверза левого борта считаются менее опасными, чем цели по носу или правому борту. Параметрами комплексного домена являются a , b , c , d [8].

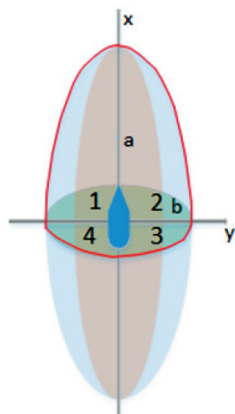


Рис. 5. Комплексный домен безопасности

Использование доменов в разных условиях плавания. На основе выполненного анализа доменов безопасности были предложены следующие конфигурации:

- круговой (для плавания в открытом море);
- комплексный (для плавания в узкостях);
- эллипс для плавания в системе разделения движения и каналах [1], [9].

Кроме того, предлагается изменять форму и параметры доменов безопасности для различных условий плавания: «плавание судов, находящихся на виду друг у друга» и «плавание судов при ограниченной видимости», которые сведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Формы доменов

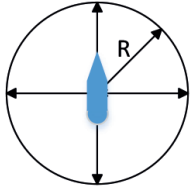
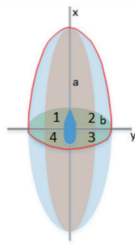
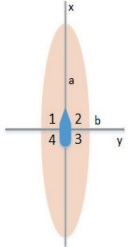
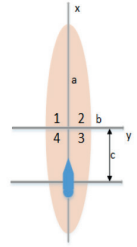
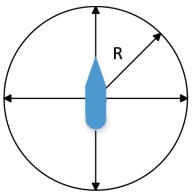
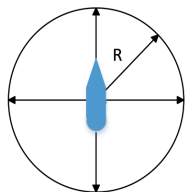
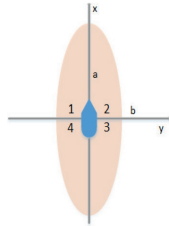
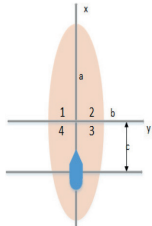
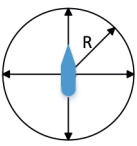
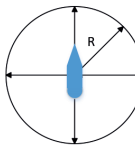
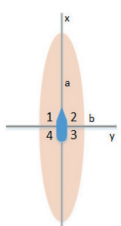
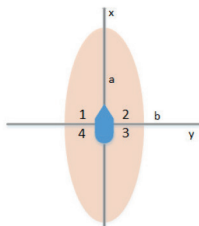
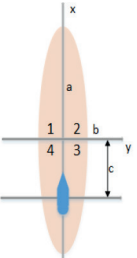
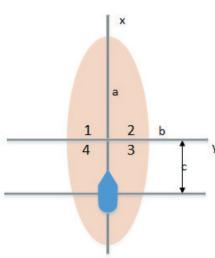
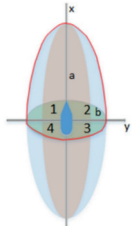
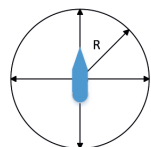
Условия плавания	Районы плавания			
	Открытое море	Узкости	Система разделения движения	Канал
Плавание судов, находящихся на виду друг друга				
Плавание судов при ограниченной видимости				

Таблица 2

Изменение параметров и формы доменов безопасности для разных условий плавания

Домен безопасности	Плавание на виду друг у друга	Плавание при ограниченной видимости	Изменение формы домена при плавании с ограниченной видимостью
	R	$R' = 2R$	
	a, b	$a' = 1,5a$ $b' = 2b$	
	a, b, c	$a' = 1,5a$ $b' = 2b$ $c' = 0$	
	a, b, c, d	$R' = 2a$	

Результаты (Results)

Алгоритм определения формы динамического домена безопасности. Для определения формы домена безопасности в реальных условиях плавания был разработан алгоритм, приведенный на рис. 6. Информацию о текущем положении судна получают от судовой GPS, о текущем районе плавания — из ECDIS, оценку условий видимости — от камер [10].

Динамические изменения домена при движении в СРД и каналах. При движении в узких каналах или полосе СРД и подходе к поворотам возможно попадание носовой части домена в полосу встречного движения. Это может приводить к появлению ложных опасных целей.

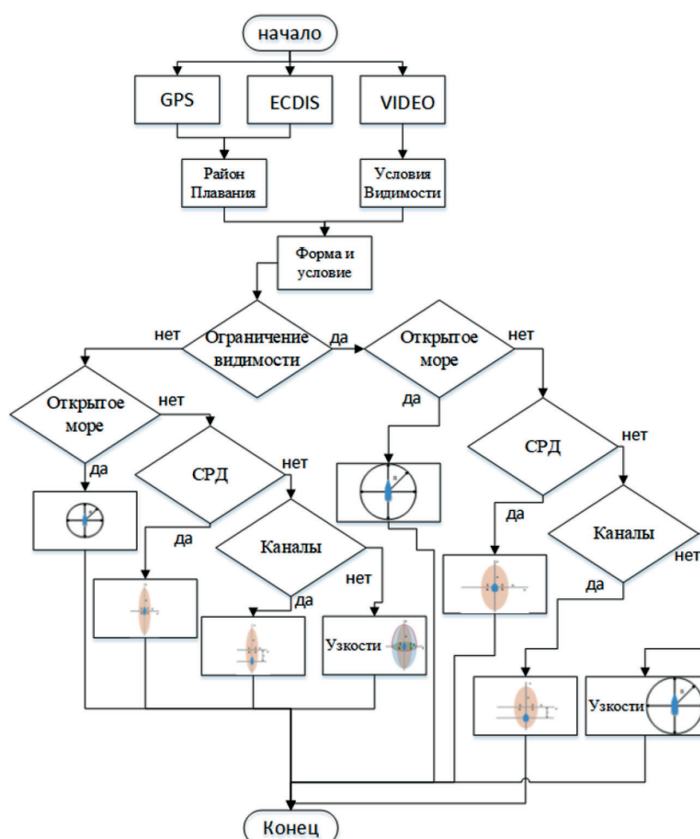


Рис. 6. Алгоритм определения формы динамического домена безопасности

Для исключения подобных ситуаций предлагается динамический домен с изменяющейся формой в виде эллипса для плавания в системе разделения движения и каналах с учетом условий плавания при ограниченной видимости и на виду друг у друга [11]. На рис. 7 показано ложное срабатывание носовой части домена при попадании в полосу встречного движения.

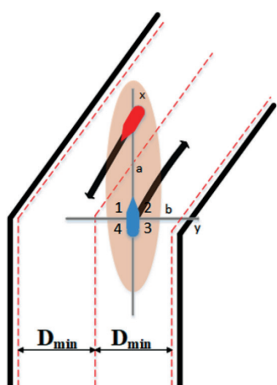


Рис 7. Ложное срабатывание носовой части домена в полосе встречного движения

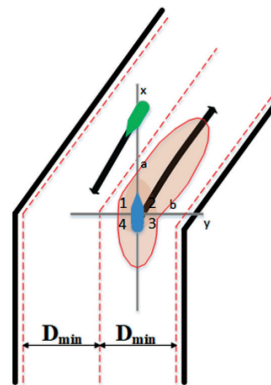


Рис 8. Предлагаемый вариант домена с изменяющейся формой

На рис. 8 приведен предлагаемый вариант динамического домена с изменяющийся формой [1], [7].

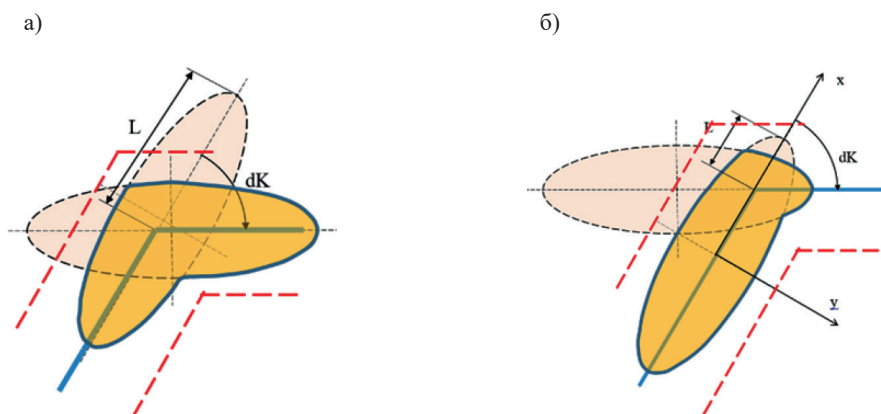


Рис. 9. Процесс деформации домена безопасности:
а — при повороте судна в узкостях (начало поворота);
б — при повороте судна в узкостях с изменяющийся формой

На рис. 9 показан процесс деформации домена безопасности при повороте судна в узкостях. Для построения деформированного эллипса необходимо рассматривать два эллипса: исходный и повернутый. В связанной с судном системе координат уравнения для обоих эллипсов выглядят следующим образом:

Исходный эллипс:

$$y = \pm b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}.$$

Повернутый эллипс:

$$x' = x \cos(dK) + y \sin(dK) + dx;$$

$$y' = -x \sin(dK) + y \cos(dK) + dy;$$

$$dx = 2(a - L) \sin^2(dK / 2);$$

$$dy = 2(a - L) \sin\left(\frac{dK}{2}\right) \cos(dK / 2).$$

где a, b — полуоси эллипса.

Форма результирующего домена безопасности формируется как комбинация исходного и повернутого эллипса и изменяется по мере движения судна к точке поворота, а затем на новом участке маршрута [12]. При этом положение собственного судна внутри исходного эллипса (и, соответственно, результирующего домена безопасности) может быть как в центре, так и смещено назад.

Заключение (Conclusion)

В статье рассмотрены вопросы оценки безопасности судна на основе домена безопасности. Предложено использовать динамический домен безопасности, который может изменять свою форму и размеры в зависимости от текущих навигационных условий. В частности, предложены несколько базовых форм домена безопасности в зависимости от района плавания: открытое море, СРД, каналы, узкости. Кроме того, предлагается изменять параметры этих доменов в зависимости от условий видимости.

Важным результатом является предлагаемый в работе метод деформации домена безопасности в случае движения судна в канале или полосе СРД. Использование деформированного домена безопасности позволяет исключить ложные срабатывания модуля оценки опасности сближения при движении в этих условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоленцев С. В. Оценка степени опасности сближения на основе динамического судового домена безопасности / С. В. Смоленцев, А. Е. Филяков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 831–839. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-831-839.
2. Егоров И. Б. Концепция зон навигационной безопасности и её применение в судовождении / И. Б. Егоров, В. А. Логиновский // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3 (69). — С. 13–17.
3. Коккрофт А. Н. Толкование МППСС-72 / А. Н. Коккрофт, Дж. Н. Ф. Ламейер; пер. с англ. (с небольшими сокр.) Н. Я. Брызгина и Н. Т. Шайхутдинова; под ред. Н. Я. Брызгина. — М.: Транспорт, 1981. — 280 с.
4. Fujii Y. Traffic capacity / Y. Fujii, K. Tanaka // The Journal of navigation. — 1971. — Vol. 24. — Is. 4. — Pp. 543–552. DOI: 10.1017/S0373463300022384.
5. Goodwin E. M. A statistical study of ship domains / E. M. Goodwin // The Journal of navigation. — 1975. — Vol. 28. — Is. 3. — Pp. 328–344. DOI: 10.1017/S0373463300041230.
6. Davis P. V. A computer simulation of marine traffic using domains and arenas / P. V. Davis, M. J. Dove, C. T. Stockel // The journal of Navigation. — 1980. — Vol. 33. — Is. 2. — Pp. 215–222. DOI: 10.1017/S0373463300035220.
7. Гриняк В. М. Визуальное представление параметров траектории безопасного движения судна / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, М. В. Трофимов // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — № 3–1 (33). — С. 269–273.
8. Tam C. K. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters / C. K. Tam, R. Bucknall, A. Greig // The Journal of Navigation. — 2009. — Vol. 62. — Is. 3. — Pp. 455–476. DOI: 10.1017/S0373463308005134.
9. Zhao J.-S. Comments of ship domains / J.-S. Zhao, Z.-L. Wu, F.-C. Wang, E. M. Goodwin // The Journal of Navigation. — 1993. — Vol. 46. — No. 3. — Pp. 422–436.
10. Бурмака А. И. Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / А. И. Бурмака // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 20–22.
11. Васьков А. С. Способы представления зоны навигационной безопасности судна / А. С. Васьков, М. А. Гаращенко // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 3 (84). — С. 38–44.
12. Гриняк В. М. Нечеткая система распознавания опасного сближения судов на морских акваториях / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2014. — № 11 (125). — С. 36–42. DOI: 10.14489/vkit.2014.011.pp.036–042.

REFERENCES

1. Smolentsev, Sergey V., and Alexey E. Filyakov. “Convergence danger degree assessment based on the dynamic ship’s safety domain.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 831–839. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-831-839.
2. Egorov, I. B., and V. A. Loginovsky. “Review of ship domain concept and it’s application in navigation.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(69) (2012): 13–17.
3. Cockcroft, A. N., and J. N. F. Lameijer. *A guide to the collision avoidance rules*. 7th edition. Butterworth-Heinemann, 2012.
4. Fujii, Yahei, and Kenichi Tanaka. “Traffic capacity.” *The Journal of navigation* 24.4 (1971): 543–552. DOI: 10.1017/S0373463300022384.
5. Goodwin, Elisabeth M. “A statistical study of ship domains.” *The Journal of navigation* 28.3 (1975): 328–344. DOI: 10.1017/S0373463300041230.
6. Davis, P. V., M. J. Dove, and C. T. Stockel. “A computer simulation of marine traffic using domains and arenas.” *The journal of Navigation* 33.2 (1980): 215–222. DOI: 10.1017/S0373463300035220.
7. Grinyak, V. M., A. S. Devyatitsil’nyi, and M. V. Trofimov. “Vizual’noe predstavlenie parametrov traektorii bezopasnogo dvizheniya sudna.” *Marine Intelligent Technologies* 3–1(33) (2016): 269–273.
8. Tam, CheeKuang, Richard Bucknall, and Alistair Greig. “Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters.” *The Journal of Navigation* 62.3 (2009): 455–476. DOI: 10.1017/S0373463308005134.
9. Zhao, Jing-Sung, Zhao-Lin Wu, Feng-Chen Wang, and E. M. Goodwin. “Comments of ship domains.” *The Journal of Navigation* 46.3 (1993): 422–436.

10. Burmaka, A. I. "The strategy of maneuvering of ships in a situation of excessive proximity." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 20–22.
11. Vaskov, A. S., and M. A. Garashchenko. "The methods for conception of ship's domain." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(84) (2017): 38–44.
12. Grinyak, V. M., and A. S. Devyatisilny. "Fuzzy logic decision-making system for ships collision avoidance." *Herald of computer and information technologies* 11(125) (2014): 36–42. DOI: 10.14489/vkit.2014.011.pp.036–042.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Смоленцев Сергей Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: sswasily@mail.ru, SmolencevSV@gumrf.ru
Филяков Алексей Евгеньевич —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_avt@gumrf.ru, icedi@rambler.ru
Исаков Дмитрий Владимирович —
доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_avt@gumrf.ru, dmail@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Smolentsev, Sergey V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: sswasily@mail.ru, SmolencevSV@gumrf.ru
Filyakov, Alexey E. —
Senior Lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_avt@gumrf.ru, icedi@rambler.ru
Isakov, Dmitry V. —
Associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_avt@gumrf.ru, dmail@mail.ru

Статья поступила в редакцию 2 октября 2023 г.
Received: October 2, 2023.