

УДК 656.62.052

DOI: 10.37890/jwt.vi84.638

## **Оценка безопасности маневрирования судов в системах водных путей по относительному навигационному риску**

**П.А. Костин**

**Е.В. Богатырева**

*ORCID: 0000-0002-3530-9898*

**М.Э. Киселевич**

*Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, Россия*

**Аннотация.** Принимая во внимание стремительные темпы развития судоходства, безопасность навигации привлекает все большее внимание как научных, так и промышленных кругов. Однако традиционные подходы, основанные на статичных методах, не всегда дают достоверные результаты, а методы, позволяющие проводить анализ в режиме реального времени, ограничены коротким прогнозным горизонтом. В связи с этим, цель статьи заключается в рассмотрении особенностей оценки безопасности маневрирования судов в системах водных путей по относительному навигационному риску. Методы исследования: моделирование, систематизация, обобщение, группировка, синтез. В процессе исследования для анализа навигационного риска предложен алгоритм, который основан на комбинации процесса нечеткой аналитической иерархии и облачной модели. В рамках алгоритма выделены и подробно описаны три взаимосвязанных этапа: создание системы индексов навигационного риска для оценки безопасности маневрирования судов, экспертная оценка факторов риска, построение облачной модели для комбинации качественных и количественных оценок риска. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что предложенный алгоритм способен описать процесс распространения риска и ключевых факторов, оказывающих на него влияние, в судовых навигационных системах.

**Ключевые слова:** навигация, риск, модель, оценка, облако, маневр, судно, матрица

## **Assessing ship manoeuvring safety in waterway systems by relative navigational risk**

**Pavel A. Kostin**

**Elena V. Bogatyreva**

*ORCID: 0000-0002-3530-9898*

**Mikhail E. Kiselevich**

*Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia*

**Abstract.** Given the rapid pace of shipping development, the safety of ship navigation has attracted much attention from both academia and industry. However, traditional approaches based on static methods do not always give reliable assessment results, and real-time assessment methods are limited by a short forecast horizon. Therefore, the aim of the paper is to review the peculiarities of assessing the safety of ship manoeuvring in waterway systems by relative navigational risk. Research methods: modelling, systematisation, analysis, generalisation, grouping, synthesis. In the research process, an algorithm is proposed to analyse the navigation risk, which is based on the combination of fuzzy analytical hierarchy process and cloud model. Within the algorithm, three interrelated stages are identified and described in detail: creation of a system of navigation risk indices to assess the safety of ship manoeuvring, expert assessment of risk factors, and construction of a cloud model for the combination of qualitative and quantitative risk assessments. The obtained results allow us to

conclude that the proposed algorithm is able to describe the process of risk propagation of key factors influencing it in ship navigation systems.

**Keywords:** navigation, risk, model, estimation, cloud, manoeuvre, vessel, matrix

### **Введение**

Безопасность маневрирования судов в системе водных путей обеспечивается соблюдением допустимых ограничений, называемых условиями безопасной эксплуатации. Данные условия устанавливают ключевые параметры «максимальных судов», которые могут с приемлемым уровнем риска маневрировать с учетом гидрометеорологических условий, характерных для определенного участка системы водных путей [1]. Международная морская организация разработала методы и концепции стандартизированной формальной оценки безопасности судоходства [2]. Однако, растущая сложность современных технологических систем и цифровых решений, поддерживающих навигацию, ставит перед учеными серьезные задачи.

Традиционные методы статической оценки не способны количественно определить процесс изменения динамического риска и его взаимосвязь с влияющими факторами, что приводит к невозможности точного и эффективного прогнозирования траектории развития и последствий навигационной ситуации. Метод моделирования в реальном времени, считающийся на сегодняшний день самым передовым и точным, недостаточен в ряде аспектов анализа рисков, особенно при расширении исследований на более длительный период времени и детальном прогнозировании последствий [3].

С учетом вышеизложенного, обновление и совершенствование существующих методов оценки безопасности судоходства, а также повышение применимости и точности методов оценки навигационного риска, составляет важную научно-практическую задачу, которая и предопределила выбор темы данной статьи.

Над разработкой подхода, который основан на системной методологии проектирования водных путей, трудятся Ke Zhang, Liwen Huang [4], Jianan Luo, Xiongfei Geng [5], Жук А.С [6]. Методы оценки навигационного риска, использующие логические рассуждения, включая анализ дерева неисправностей, байесовский анализ, теорию вероятности, рассматривают Некрасов С.Н. [7], Jonghwi Kim, Changyu Lee [8].

В тоже время, несмотря на накопленное научное наследие, некоторые вопросы требуют более детальной проработки. Так, в уточнении нуждается алгоритм локального реактивного обхода препятствий для высокоскоростных судов на основе модели устойчивого состояния направления и модели трансляционной скорости. Особого внимания заслуживают новые методы, такие как, нейронно-эволюционные системы, многоцелевые алгоритмы оптимизации роя частиц для анализа навигационного риска.

Методы исследования: системный анализ, моделирование, обобщение, группировка, синтез.

Итак, **цель статьи** можно сформулировать следующим образом - рассмотреть особенности оценки безопасности маневрирования судов в системах водных путей по относительному навигационному риску.

### **Результаты**

Факторы риска безопасности маневрирования судов характеризуются сложностью и неоднозначностью. Для оценки безопасности маневрирования судов в системах водных путей предлагаем использовать алгоритм, который основан на комбинации процесса ФАНР (нечеткая аналитическая иерархия) и облачной модели. ФАНР определяет весовое значение каждого фактора навигационного риска, далее для количественного расчета риска используется облачная модель, которая позволяет

оценить влияние отдельных факторов и определить относительный навигационный риск.

Схематически предложенный алгоритм представлен на рисунке 1.

Согласно рис. 1 алгоритм предполагает прохождение трех взаимосвязанных этапов:

(1) Создание системы индексов навигационного риска для оценки безопасности маневрирования судов.

(2) Экспертная оценка факторов риска путем попарного сравнения, на основании чего строится матрица суждений. Расчет весовых значений факторов риска первого и второго уровня с помощью нечеткой аналитической иерархии.

(3) С использованием метода расчета облачной модели, которая позволяет комбинировать качественные и количественные оценки, рассчитывается объективная оценка относительного навигационного риска.

Рассмотрим каждый из выделенных этапов более подробно.



Рис. 1. Алгоритм оценки риска безопасности маневрирования судна (разработано автором)

Создание системы индексов навигационного риска для оценки безопасности маневрирования судов. Основываясь на данных о рисках, характерных для различных типов водных путей, каждый из которых связан с определенным маневром, можно предложить следующую классификацию аварий:

1) Проход по прямому одностороннему фарватеру: наезд на портовое сооружение, посадка на мель (уклон канала), наезд на судно, которое пришвартовано у фарватера.

2) Швартовка в портовом бассейне: удар о портовое сооружение (вертикальный берег), посадка на мель, удар в судно, которое пришвартовано у причала.

3). Поворот в обозначенном районе: столкновение с судном, которое пришвартовано в районе поворота, удар о портовое сооружение, посадка на мель (уклон канала).

4) Поворот на изгибе фарватера: столкновение с портовым сооружением, посадка на мель.

5). Проход по прямому двухстороннему фарватеру: столкновение с судном, которое идет по встречному курсу, посадка на мель (уклон канала), столкновение с судном, ошвартованным на фарватере, удар о портовое сооружение.

Согласно определению относительного навигационного риска ( $R_N$ ), риск, исходящий от факторов  $A_i$  (объектов) и равный 0, означает полную безопасность навигации относительно этих факторов (объектов). Аналогично, чем выше риск (параметр  $R_N$  приближается к 1), тем ниже уровень безопасной навигации ( $S_N$ )  $\rightarrow$  ( $R_N+S_N=1$ ;  $S_N=1-R_N$ ). Таким образом, показатель навигационного риска, достигающий  $R_N=1$ , означает возникновение таких условий и/или обстоятельств, которые будут препятствовать безопасному плаванию и могут повлечь за собой 100% вероятность столкновения.

На рис. 2 представлена система индексов риска судоходства.

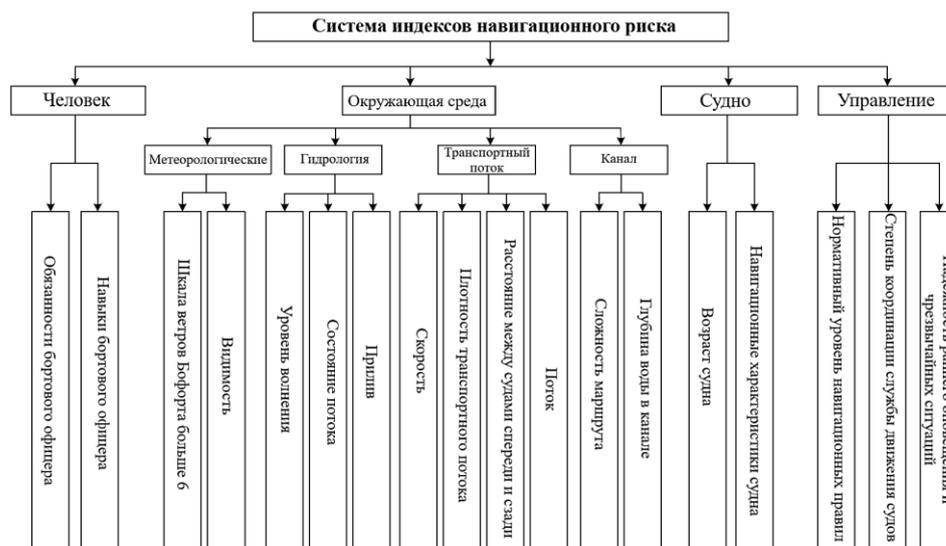


Рис. 2. Система индексов навигационного риска

*Экспертная оценка факторов риска.* В рамках данного этапа предлагается использовать метод треугольного нечеткого числа для представления нечетких сравнительных суждений экспертов. Треугольное нечеткое число в большей степени подходит для экспертного суждения, которое является неоднозначным (минимальное значение, наиболее вероятное значение и максимальное значение) [4]. Треугольное число может быть представлено следующим образом:

$$P = (l, \mu, m)$$

Параметр  $l$  является минимальным значением,  $\mu$  - наиболее вероятное значение, а параметр  $m$  - максимальное значение. Функция принадлежности  $M(\mu)$  определяется по такой формуле:

$$\mu(x|M) = \begin{cases} 0 & (x < l) \\ \frac{x-l}{m-l} & (l \leq x \leq m) \\ \frac{\mu-x}{\mu-m} & (m \leq x \leq \mu) \\ 0 & (x \geq \mu) \end{cases}$$

Матрица суждений  $F_{n \times n}$  с отношением интервальных значений имеет такой вид:

$$F_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & L & P_{1n} \\ M & O & M \\ P_{n1} & L & 1 \end{bmatrix}$$

$P_{1n}$  представляет собой отношение интервального значения для первого фактора и интервального значения для  $n$ -го фактора;  $P_{n1}$  – это обратная величина от  $P_{1n}$ .

*Расчет облачной модели.* Облачная модель используется для расчёта объективной оценки навигационного риска, влияющего на безопасность маневрирования судов при различных сценариях. Формула, используемая для измерения показателей факторов риска судовой навигационной системы, представлена следующим образом:

$$E_x = (B_{max} + B_{min})/2, \quad E_n = (B_{max} + B_{min})/6 \quad H_e = kE$$

где  $B_{max}$  и  $B_{min}$  - максимальное и минимальное значения переменных факторов риска;  $K$  - коэффициент нормализации.

Пусть  $M$  - область, а факторы риска системы навигации судна  $y$ ,  $y \in M$ ,  $y$  - случайная величина, степень принадлежности  $y$  к  $M$  выражается как  $m(y) \in [0, 1]$ . Тогда стабильное случайное число имеет вид:

$$m: M \rightarrow [0,1]$$

$$\forall: y \in M, y \rightarrow m(y)$$

В приведенной выше формуле  $y$  — это облако распределения на  $M$ , и каждое  $y$  соответствует единице облака. Модель облака может быть поделена на прямое и обратное облако. В прямую облачную модель импортируется каждый фактор риска в системе навигации судна. Для создания облачной модели используются следующие шаги:

1) Генерация случайного числа, где  $E_n$  - ожидаемое значение, а  $H_e$  - стандартное отклонение  $E_n'$ :

$$f_{E_n'}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi H_e}} \exp \left[ -\frac{(y - E_n)^2}{2H_e^2} \right]$$

2) Генерация случайного числа  $y$ , где  $E_n'$  - стандартное отклонение, а  $E_x$  - ожидаемое:

$$f_y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}[0,1]|E_n'|} \exp \left[ -\frac{(y - E_y)^2}{2E_n'^2} \right]$$

Функция  $Y$  характеризуется как:

$$f_y(y) = f_{E_n'}(y) \times f_y(y|E_n') = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi H_e |y|} \exp \left[ -\frac{(y - E_y)^2}{2x^2} - \frac{(x - E_n)^2}{2H_e^2} \right] dx$$

3) Вывод:

$$x = \exp \left[ -\frac{(y - E_y)^2}{2(E_n')^2} \right]$$

Измеренные данные судовождения подставляются в функцию принадлежности. В итоге получается степень членства  $d_{mn}$   $m$ -го параметра индекса в уровне риска судовождения  $n$ .

### Заключение

В статье представлен алгоритм оценки безопасности маневрирования судов в системе водных путей, использующий концепцию относительного навигационного риска. Предложенный алгоритм объединяет процесс нечеткой аналитической

иерархии и облачной модели. Благодаря этому он способен описать процесс распространения ключевых факторов риска в судовых навигационных системах. Относительный навигационный риск может быть использован при оценке и сравнении различных условий безопасной эксплуатации судов.

#### Список литературы

1. Горячев И.С. Исследование потери управляемости судна для обеспечения безопасного маневрирования // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. 2022. № 3 (155). С. 11-14.
2. Цыбуля А.Д. Разработка архитектуры и протокола системы обмена информацией между безэкипажным судном и центром дистанционного управления для передачи виртуальной разметки // Столыпинский вестник. 2022. Т. 4. № 5. С. 12-19.
3. Панькина С.М. Идентификация и анализ риска как фактора повышенной безопасности в судовождении // Эксплуатация морского транспорта. 2023. С. 79-86.
4. Ke Zhang, Liwen Huang Collision Avoidance Method for Autonomous Ships Based on Modified Velocity Obstacle and Collision Risk Index // Journal of Advanced Transportation. 2022. Volume 20, Issue 1. P. 34-39.
5. Jianan Luo, Xiongfei Geng Study on the Risk Model of the Intelligent Ship Navigation // Wireless Communications and Mobile Computing. 2022. Volume 4, Issue 11. P. 12-19.
6. Жук А.С. Метод оценки безопасности маневра судна на ограниченном горизонте планирования // Эксплуатация морского транспорта. 2024. № 3 (112). С. 3-9.
7. Некрасов С.Н. Современные методы идентификации моделей областей навигационной безопасности // Навигация и гидрография. 2023. № 72. С. 12-24.
8. Jonghwi Kim, Changyu Lee Field experiment of autonomous ship navigation in canal and surrounding nearshore environments // Journal of Field Robotics. 2023, Issue 2. P. 45-51.

#### References

1. Gorjachev I.S. Issledovanie poteri upravljaemosti sudna dlja obespechenija bezopasnogo manevrirovaniya [Study of loss of vessel controllability to ensure safe maneuvering], *Oboronnyj kompleks - nauchno-tehnicheskomu progressu Rossii [Defense complex - to scientific and technical progress of Russia]*, 2022, no. 3 (155), pp. 11-14.
2. Cybulja A.D. Razrabotka arhitektury i protokola sistemy obmena informaciej mezhdru bezjkipazhnym sudnom i centrom distancionnogo upravlenija dlja peredachi virtual'noj razmetki [Development of architecture and protocol of information exchange system between unmanned vessel and remote control center for transmission of virtual markings], *Stolypinskij vestnik [Stolypin Bulletin]*, 2022. no. № 5, pp. 12-19.
3. Pan'kina S.M. Identifikacija i analiz riska kak faktora povyshennoj bezopasnosti v sudovozhdenii [Identification and analysis of risk as a factor of increased safety in navigation], *Jekspluatacija morskogo transporta [Operation of sea transport]*, 2023, pp. 79-86.
4. Ke Zhang, Liwen Huang Collision Avoidance Method for Autonomous Ships Based on Modified Velocity Obstacle and Collision Risk Index. *Journal of Advanced Transportation*. 2022. Volume 20, Issue 1. pp. 34-39.
5. Jianan Luo, Xiongfei Geng Study on the Risk Model of the Intelligent Ship Navigation. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2022. Volume 4, Issue 11. pp. 12-19.
6. Zhuk A.S. Metod ocenki bezopasnosti manevra sudna na ogranichenom horizonte planirovaniya [Method for Assessing the Safety of Vessel Maneuver on a Limited Planning Horizon], *Jekspluatacija morskogo transporta [Operation of Marine Transport]*, 2024. no. 3 (112). pp. 3-9.
7. Nekrasov S.N. Sovremennye metody identifikacii modelej oblastej navigacionnoj bezopasnosti [Modern Methods for Identifying Models of Navigation Safety Areas], *Navigacija i gidrografija [Navigation and Hydrography]*, 2023. no. 72. pp. 12-24.
8. Jonghwi Kim, Changyu Lee Field experiment of autonomous ship navigation in canal and surrounding nearshore environments. *Journal of Field Robotics*. 2023, Issue 2. pp. 45-51.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Костин Павел Андреевич**, аспирант кафедры судовых энергетических установок «Керченский государственный морской технологический университет» (ФГБОУ ВО «КГМТУ»), 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, arev\_66@mail.ru

**Pavel A. Kostin**, Postgraduate student of the Department of Marine Power Plants, Kerch State Maritime Technological University, 82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309, Russian Federation, e-mail: arev\_66@mail.ru

**Богатырева Елена Владимировна**, к.т.н., доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок «Керченский государственный морской технологический университет» (ФГБОУ ВО «КГМТУ»), 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, arev\_66@mail.ru

**Elena V. Bogatyreva**, PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of of marine power plants, Kerch State Maritime Technological University, 82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309, Russian Federation, e-mail: arev\_66@mail.ru

**Киселевич Михаил Эдуардович**, курсант специальности Эксплуатация судовых энергетических установок «Керченский государственный морской технологический университет» (ФГБОУ ВО «КГМТУ»), 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, arev\_66@mail.ru

**Mikhail E. Kiselevich**, student of the Ship Power Plants Operation specialty, Kerch State Maritime Technological University, 82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309, Russian Federation, e-mail: arev\_66@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.08.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.  
Received 05.08.2025; published online 20.09.2025.