

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Статья посвящена проблеме разработки формализованной оценки безопасности (ФОБ) акватории Северного морского пути (СМП), принципы которой сформулированы в документах Международной морской организации. В работе приведены результаты анализа публикаций, посвященных разработке ФОБ на морском транспорте. Отмечены основные недостатки метода экспертных оценок, используемого большинством авторов публикаций при определении вероятности нежелательного события и риска навигационных аварий. Предложен альтернативный метод вычисления указанных параметров, основанный на теории геометрических вероятностей. В качестве меры навигационной безопасности акватории автор использует вероятность пересечения пути судна с навигационной опасностью. Дано описание обобщенной модели ледяных полей и отмелей, представляющих основную угрозу для мореплавания на СМП. Установлены критерии и взаимосвязь основных количественных характеристик навигационных опасностей с осадкой судна, его шириной, скоростью и ледовой проходимостью. Проверку формализации оценки безопасности акватории СМП, на основе разработанного автором метода, планируется выполнить с использованием материалов, относящихся к действующим судоходным трассам.

Ключевые слова: Северный морской путь, формальная оценка безопасности, ледовое поле, мелководье, модель опасности, мера опасности.

Северный морской путь (СМП) как морская транспортная магистраль имеет существенные особенности, оказывающие влияние на безопасность навигации по сравнению с остальными транспортными путями мира. Тема оценки безопасного плавания по СМП приобретает особую актуальность в связи с повышением интенсивности судоходства, увеличением тоннажа судов и разработкой перспективных программ круглогодичного использования СМП [1] – [5]. Комитеты морской безопасности и защиты морской окружающей среды при Международной морской организации (ИМО) в 1997 г. одобрили Временное руководство по применению концепции Формальной оценки безопасности (ФОБ) [6]. Концепция содержит общие принципы обеспечения безопасной эксплуатации судна, включающие защиту жизни и здоровья людей, окружающей среды и собственности. Анализ публикаций, посвященных ФОБ на морском транспорте, показывает, что они в основном делятся на две группы.

К первой группе относятся работы, посвященные методологии ФОБ [7] – [9].

Во вторую группу входят работы, посвященные разработкам комплексных оценок безопасности транспортных перевозок, направленных на снижение аварийности на морском транспорте, связанной с человеческим фактором, навигационной аварийностью, а также надежностью судовых систем и установок [10] – [15]. Все работы имеют исследовательский характер и направлены на формирование подходов и аппарата описания и реализации принципов ФОБ, общих для всех морских путей мира.

Особенности арктической навигации, такие как низкие температуры, ледовитость, обширные мелководья, малая гидрографическая изученность арктических морей в целом, относительно слаборазвитая инфраструктура поиска и спасения, учтены при разработке Полярного кодекса [16], в основу которого также заложены принципы ФОБ. Первым и основополагающим этапом ФОБ является идентификация и описание опасностей, приводящих к развитию опасных ситуаций [6]. В основе ФОБ лежит оценка вероятности развития опасных ситуаций по конкретным сценариям P и связанной с ними тяжестью последствий Q . (Параметр Q в данной работе не рассматривается).

Произведение параметров P и Q определяет риск нежелательного события:

$$r = PQ. \quad (1)$$

В формуле (1) параметр P имеет смысл вероятности или частоты нежелательного события. С практической точки зрения вычисление параметра P представляет определенные сложности, связанные с проблемой испытаний и с конечным числом исходов, включаемых в статистическую выборку, или полным отсутствием статистической выборки [17]. Для преодоления этого затруднения рекомендуется использовать либо экспертные оценки величины параметра P , либо процедуры, связанные с вычислением геометрических вероятностей [18] (те и другие имеют свои недостатки и ограничения).

Метод экспертных оценок относится к инструментарию количественной оценки альтернатив в условиях слабо формализуемой проблемной ситуации. Главный недостаток экспертных оценок состоит в невозможности получить оценку точности оцениваемого параметра. Геометрические вероятности позволяют точно и объективно определить параметр P , однако для этого задачу вычисления отношения числа событий требуется преобразовать в задачу попадания точек или прямых в определенную область. Для арктического мореплавания основными навигационными опасностями являются лёд и мели.

В качестве меры нежелательного события предлагается использовать вероятность пересечения маршрута судна с опасностями. Модель обособленной опасности задаётся в следующем виде:

$$R = R[k_1, k_2, k_3, \dots, k_n], \quad (2)$$

где R — геометрический размер и форма навигационной опасности; $k_1, \dots, k_n$ — аргументы функции R , описывающие параметры навигационной опасности.

С учетом того, что большинство навигационных задач на практике решается на навигационных морских картах, целесообразно представить обособленные опасности их плоскими контурами. Такое преобразование может быть выполнено соответствующим заданием аргументов функции (2). При описании ледового поля модель (2) приобретает вид

$$R = R[x(t), y(t), h(t), t], \quad (3)$$

где $x(t), y(t), h(t)$ — плановые координаты ледового поля и его толщина, зависящие от времени t .

При переходе от общей модели (2) к частной модели (3) выполнена замена аргументов $k_1 = x(t)$, $k_2 = y(t)$, $k_3 = h(t)$, $k_4 = t$. Толщина ледового поля, изменяющаяся во времени, описывается параметром $h(t)$. Таким образом, модель (3) описывает ледовое поле, которое может во времени менять свою форму и размеры, толщину и плановое положение. Эта модель может использоваться для описания локального ледяного поля, ледяных торосов, айсбергов и других ледовых образований льда. Сплошное ледовое поле в модели (3) соответствует условию $R \rightarrow \infty$, а отсутствие льда — условию $R \rightarrow 0$. Ледовое поле (3), представляющее опасность для судна, имеющего класс ледового усиления W , задается множеством

$$R_0^h = R[x(t), y(t), h(t) > h_{cr}(W), t]. \quad (4)$$

Критическая толщина льда $h_{cr}(W)$ установлена Правилами Российского морского регистра судоходства [19] в зависимости от ледового класса судна. Для арктических категорий судов (Arc4 — Arc9) допустимые значения характеристик и толщины льда, при которых судно способно идти в канале за ледоколом с малой скоростью (3 — 5 уз), не подвергаясь повышенному риску получения повреждений в результате взаимодействия корпуса со льдом, приведены в следующей таблице [19].

**Допустимые значения характеристик и толщины льда,
при которых судно способно идти в канале за ледоколом с малой скоростью**

Категория судна	Допустимые тип и толщина льда	
	Зимне-весенняя навигация	Летне-осенняя навигация
Arc4	Тонкий однолетний	Средний однолетний до 0,9 м
Arc5	Средний однолетний до 0,8 м	Средний однолетний

Таблица
(Окончание)

Arc6	Средний однолетний	Толстый однолетний
Arc7	Толстый однолетний до 1,8 м	Двухлетний
Arc8	Многолетний до 3,4 м	Многолетний
Arc9	Многолетний	Многолетний

Примечание. Классификация льдов принята согласно «Номенклатуре морских льдов» Всемирной метеорологической организации («Sea Ice Nomenclature») of the World Meteorological Organization (WMO)):

<i>Тип льда:</i>	<i>Толщина льда:</i>
многолетний	> 3,0 м
двухлетний	> 2,0 м
толстый однолетний	> 1,2 м
средний однолетний	0,7 – 1,2 м
тонкий однолетний	< 0,7 м

При описании локального поднятия морского дна модель (2) приобретает следующий вид:

$$R = R[x, y, z], \quad (5)$$

где x, y — плановые координаты локального поднятия.

Распределение глубин в границах локального поднятия описывается параметром z . Таким образом, модель (5) описывает поднятие морского дна, которое во времени не меняет своего планового положения и форму.

Поднятие дна в модели (5) считается опасным для судна с осадкой d , если

$$R_0^d = R[x, y, z < z_{np}(d)]. \quad (6)$$

В формуле (6) $z_{np}(d)$ соответствует значению предельной проходной глубины для судна с осадкой d . Для судов с осадками d_1 и d_2 справедливы соотношения: если $d_1 > d_2$, то $R_0^{d_1} > R_0^{d_2}$, т. е. суда, имеющие большую осадку, в большей степени стеснены на мелководье.

В районе плавания в общем случае может находиться множество опасностей вида $\{R_0^h\}$ и / или $\{R_0^d\}$. Сведения о наличии и свойствах опасностей, принадлежащих множествам $\{R_0^h\}$ и $\{R_0^d\}$, содержатся на ледовых и навигационных морских картах соответственно.

В период летне-осенней навигации опасности вида $\{R_0^h\}$ — льды — могут сокращаться вплоть до полного исчезновения. В зимне-весеннюю навигацию множество $\{R_0^h\}$ достигает максимальной величины [20]. Отношение совокупной площади ледяного покрова к общей площади акватории представляет собой одну из важнейших навигационных характеристик условий плавания в арктических морях — сплоченность льда. Множество $\{R_0^d\}$ — отмели — сезонным изменениям не подвержено. Навигационные опасности, лед и отмели, описываемые множествами $\{R_0^d\}$ и $\{R_0^h\}$, предлагается учитывать совместно.

Маршруты судна зададим множеством линий $\{G(W, B, V, d)\}$, где W — категория ледового усиления; B — ширина; V — скорость и d — осадка судна.

Вероятность P_0 пересечения маршрутов судна $\{G(W, B, V, d)\}$ хотя бы с одной из опасностей вида $\{R_0^h\}$ или $\{R_0^d\}$ представляет собой меру нежелательного события $G(W, B, V, d) \cap \{R_0^h, R_0^d\} \neq \emptyset$ и определяется по формуле

$$P_0 = P[\{G(W, B, V, d)\} \cap \{R_0^h, R_0^d\} \neq \emptyset]. \quad (7)$$

Вероятность безопасного плавания P_s определяется условием, при котором ни один из маршрутов $\{G(W, B, V, d)\}$ не пересечет ни одну из опасностей $\{R_0^h\}$ или $\{R_0^d\}$. Это условие устанавливается зависимостью

$$P_s = P[\{G(W, B, V, d)\} \cap \{R_0^h, R_0^d\} = \emptyset]. \quad (8)$$

События, заданные условиями (7) и (8), составляют полную группу событий, т. е.

$$P_0 + P_S = 1. \quad (9)$$

Формулы (7) и (8) могут использоваться либо для оценки безопасного плавания по рекомендованным путям или каналам, которые характеризуются полосой с заданной шириной и направлением, либо для оценки безопасного плавания во всей заданной акватории. Различие в решении этих задач определяется ограничениями, которые должны быть установлены при выборе множества $\{G(W, B, V, d)\}$. Для рекомендованного пути с заданной шириной полосы движения в множество маршрутов вводятся линии, направление которых соответствует направлению рекомендованного пути. Для всей акватории в множество маршрутов вводятся линии, ориентированные по всем возможным направлениям.

Выводы

1. Предложенный подход к формализации оценки безопасности арктической морской навигации, основанный на методах теории вероятности, позволяет преодолеть основные недостатки, присущие методам экспертных оценок.
2. В работе предложен единый подход для описания ледяных полей и отмелей, представляющих собой два основных вида навигационных опасностей в акватории СМП.
3. Проверку предложенного способа формализации оценки безопасности арктического мореплавания планируется выполнить для реальных участков СМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу. Утвержден Президентом РФ 18 сентября 2008 года.
2. Федеральный закон от 28 июля 2012 г. № 132-ФЗ. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части государственного регулирования торгового мореплавания в акватории Северного морского пути.
3. *Дмитриев А. А.* История мореплавания по трассам северного морского пути в XX и начале XXI века: в 3 т. / А. А. Дмитриев, Ю. А. Горбунов, В. Т. Соколов. — СПб.: Морская энциклопедия, 2015. — Т. 3. — 303 с.
4. *Куватов В. И.* Потенциал Северного морского пути арктической зоны России. Факторы и стратегия развития / В. И. Куватов, Д. В. Козьмовский, Н. В. Шаталова // Интернет-журнал Науковедение. — 2014. — № 6 (25). — С. 20.
5. *Смирнов А. А.* Перспективы развития Северного морского пути (к 55-летию атомного ледокольного флота России) / А. А. Смирнов, С. А. Головинский // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 4 (16). — С. 108–114.
6. IMO Maritime Safety Committee: 'Interim Guidelines for the Application of Formal Safety Assessment' («Временное Руководство по применению формальной оценки безопасности»), MSC Circular 829. — London, 1997.
7. *Захаров А. А.* Формализованная оценка безопасности — универсальный инструмент для снижения риска на транспорте / А. А. Захаров // Транспорт Российской Федерации. — 2006. — № 3 (3). — С. 66–68.
8. *Королев В. Ю.* Математические основы теории риска: Физико-математическая литература / В. Ю. Королев, В. Е. Бенинг, С. Я. Шоргин. — М.: Физматлит, 2007. — 543 с.
9. *Скороходов Д. А.* Принципы и категории обеспечения безопасности мореплавания / Д. А. Скороходов, Л. Ф. Борисова, З. Д. Борисов // Вестник МГТУ. — 2010. — Т. 13. — № 4-1. — С. 719–729.
10. *Емельянов М. Д.* Безопасность морского транспорта России / М. Д. Емельянов // Транспорт Российской Федерации. — 2008. — № 2 (15). — С. 38–43.
11. *Емельянов М. Д.* Применение условных рисков для оценки безопасности морских судов / М. Д. Емельянов // Транспорт Российской Федерации. — 2009. — № 3-4 (22). — С. 40–45.
12. *Мойсеенко С. С.* Безопасность морских грузоперевозок / С. С. Мойсеенко, Л. Е. Мейлер. — Калининград: Изд. БГАРФ, 2011. — 398 с.

13. Логиновский В. А. Моделирование оценки вероятности посадки судна на грунт с помощью нечетких чисел / В. А. Логиновский, А. А. Струков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 89–96.
14. Некрасов С. Н. Оценка и прогнозирование опасных навигационных ситуаций / С. Н. Некрасов, И. В. Капустин, М. С. Старов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2. — С. 98–100.
15. Решетняк С. В. Ранжирование трасс Севморпути по критерию гидрографической обеспеченности / С. В. Решетняк, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 3. — С. 55–57.
16. Полярный Кодекс. ИМО. - 2014/2015 – Резолюции MSC/385(94), MEPC.264 (68). Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс). — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. — 232 с.
17. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. — М.: Высш. шк., 2003. — 479 с.
18. Сантало Л. Интегральная геометрия и геометрические вероятности / пер. с англ. В. М. Максимова / Л. Сантало. — М.: Наука, 1983. — 358 с.
19. Правила классификации и постройки морских судов. — Т. 1. — НД № 2-020101-72. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2013. — 503 с.
20. Миронов Е. У. Модели и методы расчета и прогноза ледовых и океанографических условий в арктических морях / Е. У. Миронов, И. М. Ашик, В. И. Дымов [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2010. — № 2 (85). — С. 16–28.

FORMALIZATION OF THE ASSESSMENT OF SAFETY OF ROUTES OF THE NORTHERN SEA ROUTE

The article is devoted to a problem of development of the formalized safety assessment of the water area of the Northern Sea Route (NSR) which principles are formulated in documents of the International sea organization. The results of the analysis of the publications devoted to development of the formalized safety assessment on sea transport are given in work. The main shortcomings of the method of expert evaluations used by most of authors of publications when determining probability of an undesirable event and risk of navigation accidents are noted. The alternative method of calculation of the specified parameters based on the theory of geometrical probabilities is offered. As a measure of navigation safety of the water area the author uses probability of crossing of a way of the vessel with navigation danger. The description of the generalized model of the ice-rinks and shallows posing the main threat for navigation on NSR is given. Criteria and interrelation of the main quantitative characteristics of navigation dangers with vessel draft, its width, speed and ice passability are established. The check of formalization of an assessment of safety of the water area of NSR based on the method developed by the author is planned to be executed with use of the materials relating to the operating navigable routes.

Keywords: Northern Sea Route, Formal Safety Assessment, ice field, shoal, danger model, danger measure.

REFERENCES

1. Osnovy gosudarstvennoj politiki Rossijskoj Federacii v Arktike na period do 2020 goda i dal'nejshuju perspektivu. Utverzhden Prezidentom RF 18 sentjabrja 2008 goda.
2. Federalnyj zakon ot 28 ijulja 2012 g. N 132-FZ. O vnesenii izmenenij v otdelnye zakonodatelnye akty Rossijskoj Federacii v chasti gosudarstvennogo regulirovanija torgovogo moreplavanija v akvatorii Severnogo morskogo puti.
3. Dmitriev, A. A., Ju. A. Gorbunov, and V. T. Sokolov. *Istorija moreplavanija po trassam severnogo morskogo puti v HH i nachale HHI veka: v 3 t.* Vol 3. SPb: Morskaja jenciklopedija, 2015.
4. Kuvatov, Valery Il'ich, Dmitry Vasil'evich Kozmovsky, and Natalya Viktorovna Shatalova. "The potential of the Northern Sea Route in the Arctic zone of Russia. Factors and strategy development." *On-line journal "Naukovedenie"* 6(25) (2014): 20.
5. Smirnov, A. A., and S. A. Golovinsky. "55th Anniversary of the Russian Nuclear Icebreaker Fleet and Development of the Northern Sea Route." *Arktika: jekologija i jekonomika* 4(16) (2014): 108–114.

6. IMO Maritime Safety Committee: 'Interim Guidelines for the Application of Formal Safety Assessment', MSC Circular 829. London, 1997.
7. Zaharov, A. A. "Formalizovannaja ocenka bezopasnosti — universalnyj instrument dlja snizhenija riska na transporte." *Transport of the Russian Federation* 3(3) (2006): 66–68.
8. Korolev, V. Ju., V. E. Bening, and S. Ja. Shorgin. *Matematicheskie osnovy teorii riska: Fiziko-matematicheskaja literatura*. M.: Fizmatlit, 2007.
9. Skorohodov, D. A., L. F. Borisova, and Z. D. Borisov. "Principy i kategorii obespechenija bezopasnosti moreplavaniya." *Vestnik of MSTU* 13.4-1 (2010): 719–729.
10. Emeljanov, M. D. "Bezopasnost morskogo transporta Rossii." *Transport of the Russian Federation* 2(15) (2008): 38–43.
11. Emelyanov, M. D. "Use of conventional risks in estimation of security of seaborne ships." *Transport of the Russian Federation* 3-4(22) (2009): 40–45.
12. Mojseenko, S. S., and L. E. Mejler. *Bezopasnost morskikh gruzoperevozok*. Kaliningrad: Izd. BGARF, 2011.
13. Loginovskij, V. A., and A. A. Strukov. "Modeling of the probability assessment of grounding the vessel by fuzzy numbers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(20) (2013): 89–96.
14. Nekrasov, S. N., I. V. Kapustin, and M. S. Starov. "Assessment and prediction of dangerous navigational situations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2 (2013): 98–100.
15. Reshetnyak, S. V., A. B. Afonin, and A. L. Tezikov. "Ranging of routes of north sea-route on the criterion of hydrographical support." *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2008): 55–57.
16. International code for ships operating in polar waters (Polar code). SPb.: AO «CNIIMF», 2016.
17. Gmurman, V. E. *Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika*. M.: Vysshaja shkola, 2003.
18. Santalo, L. *Integralnaja geometrija i geometricheskie verojatnosti*. Trans. M.: Nauka, 1983.
19. *Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov*. Tom 1. ND №2-020101-72. SPb.: Rossijskij morskij registr sudohodstva, 2013.
20. Mironov, E. U., I. M. Ashik, V. I. Dymov, M. Ju. Kulakov, and S. V. Kljachkin. "Modeli i metody rascheta i prognoza ledovyh i okeanograficheskikh uslovij v arkticheskikh morjah." *Problemy Arktiki i Antarktiki* 2(85) (2010): 16–28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Клюев Виталий Владимирович
Минтранс России
klyuevvv@mintrans.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kljuev Vitaly Vladimirovich
The Ministry of Transport of the Russian Federation
klyuevvv@mintrans.ru

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-74-85
УДК 624.012.4; 626.02

**К. П. Моргунов,
М. В. Красникова**

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КАМЕР ШЛЮЗОВ ВОЛГОГРАДСКОГО ГИДРОУЗЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Данные наблюдений и измерений за деформациями стен камер шлюзов Волгоградского гидроузла в последние годы показали изменение параметров, характеризующих состояние сооружений и конструкций. Для оценки напряженно-деформированного состояния стен камер шлюзов были разработаны математические конечно-элементные модели нижних и верхних камер шлюзов с учетом блочного строения и фактического армирования. Выполненные расчеты системы «две камеры, основание и засыпки» для шести