

ККС Салехард и ККС Ханты-Мансийск в северном направлении по предварительной оценке, сделанной на основании математического моделирования форм периметров зон действия указанных ККС, разрыв составляет 30 км, в остальных случаях имеет место надежное перекрытие зон действия ККС. Здесь также стоит отметить, что имеет место несколько избыточное перекрытие зона действия ККС Ханты-Мансийск, ККС Сургут и ККС Тобольск, так как эта зона составляет более 280 км, что сопоставимо с радиусом зоны действия ККС Ханты-Мансийск. Однако при смещении ККС Ханты-Мансийск в северо-западном направлении по предварительным расчетам на 100 км можно добиться покрытия практически всей акватории рассматриваемого района.

Список литературы

1. Каретников В. В. Автоматизация судовождения / В. В. Каретников, В. Д. Ракитин, А. А. Сикарев. — СПб.: СПГУВК, 2007. — 265 с.
2. Андриюшечкин Ю. Н. / Ю. Н. Андриюшечкин, В. В. Каретников, А. А. Сикарев // Морская радиоэлектроника. — № 3 (37). — СПб., 2011.
3. Андриюшечкин Ю. Н. Повышение эффективности информационного обеспечения речной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS для мониторинга и управления движением судов: дис. / Ю. Н. Андриюшечкин. — СПб., 2012. — 150 с.

УДК 656.61.052

В. А. Логиновский,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. А. Струков,
аспирант,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ПОСАДКИ СУДНА НА ГРУНТ С ПОМОЩЬЮ НЕЧЕТКИХ ЧИСЕЛ

MODELING OF THE PROBABILITY ASSESSMENT OF GROUNDING THE VESSEL BY FUZZY NUMBERS

В статье описана методика анализа деревьев отказов как одного из методов моделирования опасных ситуаций и аварий в мореплавании. Методика позволяет получить количественную оценку вероятности (частоты) нежелательного события (потенциальной аварии) в условиях нечеткого задания исходных данных. Неопределенность исходных данных может иметь эпистемологический характер, источником которого являются экспертные оценки. Для описания вероятностей исходных событий предлагается использовать нечеткие числа. Количественные характеристики функций принадлежности определяются выбранной шкалой квантификаторов. Приводится пример реализации способа уровней множеств для решения задачи вероятностной оценки риска посадки судна на мель при прохождении узкости.

The article contains the description of Fault Tree Analysis as one of the methods of modeling the accidents and near misses in navigation. This method results in a quantitative evaluation of probability (frequency) of the potential hazardous event in fuzzy environment. Uncertainty of the initial data may be epistemic, i.e. caused by expert judgment. It is proposed in the article to use the fuzzy numbers to describe the probabilities of the initial events of the accident scenario. The quantitative characteristics of the membership functions are determined by particular quantifier scale. The example of using the level sets method for evaluation the probability of grounding the ship in the shallow waters is given.

Ключевые слова: ПДНВ, риск, вероятность, посадка на мель, нечеткие числа, дерево отказов.
Key words: STCW, risk, probability, grounding, fuzzy numbers, fault tree.

Введение

Безопасность мореплавания является одним из самых важных вопросов в судоходной индустрии. Международный кодекс по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращению загрязнения (МКУБ) и Система управления безопасностью (СУБ), построенная на его основе, регулируют деятельность судоходных компаний и экипажей судов в этой сфере деятельности.

В соответствии с Манильскими поправками к Конвенции и Кодекса ПДНВ 78 командный состав транспортных судов должен уметь оценивать риск в различных видах деятельности экипажа на борту судна, а судоходные компании обязаны оценить все выявленные риски для ее судов, персонала и окружающей среды и обеспечить соответствующую защиту [8].

Согласно циркуляру ИМО [7] термин «риск» определяется как комбинация вероятности и тяжести последствий нежелательных событий. Важным вопросом для оценки риска является разработка методов оценки вероятности нежелательного события. Для оценки вероятности циркуляр рекомендует использовать такие логические методы, как дерево событий и дерево отказов, а также их комбинацию [7].

При недостатке статистических данных для оценки вероятности нежелательного события согласно п. 3.2.1 циркуляра [7] предлагается использовать экспертные оценки, а также физические, аналитические модели и имитационное моделирование.

1. Способы задания экспертных оценок в виде нечетких чисел

Нечетким подмножеством A во множестве U называется совокупность пар вида $(u, \mu_A(u))$, где $\mu_A(u)$ — функция принадлежности (ФП) нечеткого подмножества. Нормированная ФП принимает значение в диапазоне $[0,1]$;

U называется универсальным множеством и состоит из элементов u , что записывается в виде $u \in U$ (то есть элемент u принадлежит множеству U).

ФП $\mu_A(u)$ определяет степень принадлежности любого элемента подмножества A множеству U .

Нечеткие числа — это нечеткие переменные, определенные на оси действительных чисел R .

Нечеткое число определяется как нечеткое подмножество A на множестве R с ФП $\mu_A(u) \in [0,1]$ и $u \in R$ [2].

Например, некоторое число u может быть задано в виде: $\{0/0,1; 0,5/0,2; 1/0,3; 0,25/0,4; 0/0,5\}$, где знаменатель означает степень принадлежности числа u некоторому элементу оси R .

График будет выглядеть следующим образом:

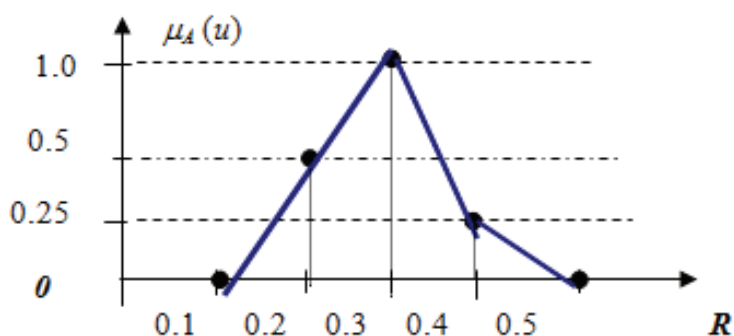


Рис. 1. Графическое изображение нечеткого числа u

В зависимости от источника возникновения неопределенность делится на два типа: случайная и эпистемологическая.

Случайная или статистическая неопределенность возникает из-за естественной, непредсказуемой изменчивости в поведении изучаемой системы. Знания экспертов не могут быть использованы для уменьшения данной неопределенности, но могут служить для получения ее количественной оценки. Например, неоднократное прохождение судна по одному и тому же фарватеру не дает абсолютно идентичных траекторий его движения вследствие влияния на него различных и не всегда предсказуемых возмущающих воздействий.

Эпистемологическая или систематическая неопределенность возникает вследствие отсутствия у эксперта практического знания о поведении системы, и эта неопределенность принципиально разрешима. С психологической точки зрения она показывает возможность существования ошибок в знаниях эксперта. Например, эксперт утверждает, что вероятность отказа электронного прибора ниже, чем механического, но не совсем в этом уверен.

Исходя из вышесказанного, источниками случайной неопределенности могут служить ошибки в измерениях или эмпирические данные, а эпистемологической — мнение экспертов и прогнозы на будущее.

Для количественного оценивания частоты (вероятности) события за определенный временной интервал в случае экспертных оценок применяют методику шкалирования квантификаторов, пример использования которой приведен в табл. 1 [3].

Таблица 1

Шкалирование квантификаторов

Разряд шкалы	Шкала квантификатора	Частота
1	Почти никогда	$< 0,1$
2	Очень редко	$0,1 < f < 0,3$
3	Редко	$0,3 < f < 0,45$
4	Ни часто, ни редко	$0,45 < f < 0,55$
5	Часто	$0,55 < f < 0,8$
6	Очень часто	$0,8 < f < 0,95$
7	Почти всегда	$> 0,95$

Для каждого разряда шкалы возможно введение следующих качественных понятий, относящихся к степени уверенности экспертов при формировании суждения о частоте (вероятности) реализации события и определяющих тип функции принадлежности (рис. 2). На рис. 2 по горизонтальной оси отложена P -вероятность (частота) нежелательного события, выраженная нечетким

числом вида $\{a/\mu; b/\mu; c/\mu; d/\mu\}$, а по вертикальной оси μ — степень уверенности эксперта в утверждении о вероятности события.

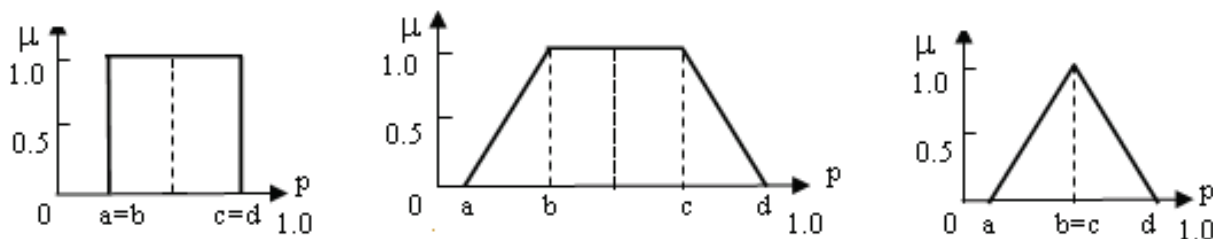


Рис. 2. Типы ФП в зависимости от степени уверенности эксперта.

Интервальная оценка среднего (тип ФП — прямоугольник),
неуверенная оценка среднего в виде интервала и граничных значений (типа ФП — трапеция),
уверенная оценка среднего в виде точечной оценки и граничных значений (тип ФП — треугольник)

Таким образом, используя некоторую шкалу квантификаторов, применяя различные формы функций принадлежности, возможно формирование моделей неопределенности экспертных оценок широкого класса.

2. Пример реализации метода уровневых множеств

Методы анализа деревьев отказов (ДО) и деревьев событий (ДС) включают в себя разработку методик выполнения операций над нечеткими числами. Дерево отказов — организованное графическое представление условий или других факторов, вызывающих нежелательное событие, называемое вершиной событий [1]. Под ДО в данной статье понимается логико-вероятностная модель, элементами которой являются вероятности нежелательных событий, связанных с безопасностью мореплавания.

Для реализации методик выполнения монотонных (возрастающих или убывающих) операций над нечеткими числами формируются уровневые множества. Суть способа, который является дальнейшим развитием принципа обобщения, состоит в представлении нечеткого числа в виде набора выпуклых нечетких подмножеств функций принадлежности, являющихся либо строго возрастающими, либо строго убывающими, либо постоянными.

Если непрерывное нечеткое число может быть дискретизировано по конечному числу уровней, то операции над нечеткими числами сводятся к выполнению операций над участками одинаковой монотонности отдельно. Операции выполняются над абсциссами точек, расположенных на одном уровне и участках одинаковой монотонности соответствующих функций принадлежности. Конечный результат получается объединением соответствующих функций принадлежности.

Рассмотрим пример реализации метода уровневых множеств в задаче оценки вероятности произведения двух событий, функции принадлежности которых имеют вид трапеции (рис. 3).

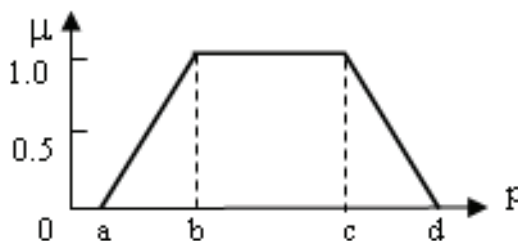


Рис. 3. Функция принадлежности вероятности события

Функция принадлежности в виде трапеции может быть интерпретирована как результат опроса экспертов, которые сформулировали свои суждения о прогнозе вероятностей следующим

образом: вероятность событий 1 и 2 находится в интервале $[a, d]$, но уверенная оценка вероятности лежит в интервале $[b, c]$. В табл. 2 приведены численные значения параметров построения a , b , c , d функции принадлежности для каждого события.

Таблица 2

Значения параметров функции принадлежности

Параметры	a	b	c	d
Событие 1	0,2	0,3	0,4	0,5
Событие 2	0,6	0,7	0,8	0,9

Для удобства анализа результатов вычислений примем число уровней дискретизации $k = 4$. Графическое пояснение дискретизации функции принадлежности приведено на рис. 4 и в табл. 2.

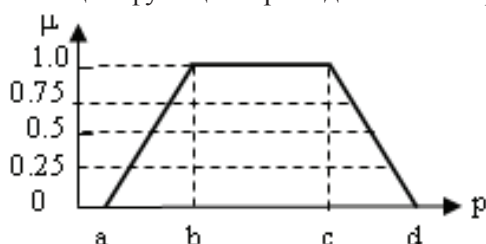


Рис. 4. Дискретизация функции принадлежности по числу уровней $k = 4$

В табл. 3 приведены примеры расчета вероятностей вершинного события в случае, когда два инициирующих события случаются одновременно (логическая операция «И» или умножение) и когда случается одно из инициирующих событий (логическая операция «ИЛИ», сложение). По таким же расчетам будет производиться вычисление вероятности вершинного события в дереве отказов, приведенном далее в работе.

В столбце «Монотонность» в табл. 3 условно обозначен характер монотонности функций принадлежности: «+» — возрастающий, «-» — убывающий и «=» — постоянный. Так как число уровней дискретизации для значений вероятностей событий 1 и 2 одинаково, то результаты действий над нечеткими числами также будут иметь выбранное число уровней дискретизации (в нашем случае — 4). Значения функций принадлежности для каждого уровня дискретизации приведены в столбце $\mu(p_i)$. Значения аргументов (вероятностей) для каждого элемента приведены в столбцах P_1 и P_2 .

Таблица 3

Исходные данные и результаты операций логического умножения («И») и сложения («ИЛИ») над нечеткими числами

Монотонность	$\mu(p_i)$	P_1	P_2	«И» (конъюнкция)	«ИЛИ» (дизъюнкция)
+	0	0,2	0,6	0,120	0,680
+	0,25	0,225	0,625	0,141	0,709
+	0,5	0,25	0,65	0,163	0,737
+	0,75	0,275	0,675	0,186	0,764
+	1	0,3	0,7	0,210	0,790
=	1	0,325	0,725	0,236	0,814
=	1	0,35	0,75	0,263	0,838
=	1	0,375	0,775	0,291	0,859
=	1	0,4	0,8	0,320	0,880
-	0,75	0,425	0,825	0,351	0,899
-	0,5	0,45	0,85	0,383	0,918
-	0,25	0,475	0,875	0,416	0,934
-	0	0,5	0,9	0,450	0,950

В результате вычислений получаем оценки вероятностей вершинных событий, описываемые нечеткими числами в зависимости от сценария «ИЛИ» (рис. 5), «И» (рис. 6).

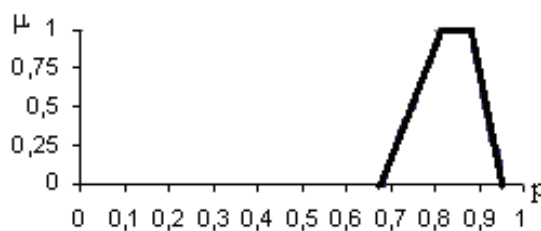


Рис. 5. Результат вычисления оценки вероятности вершинного события при применении операции «ИЛИ» (дизъюнкции)

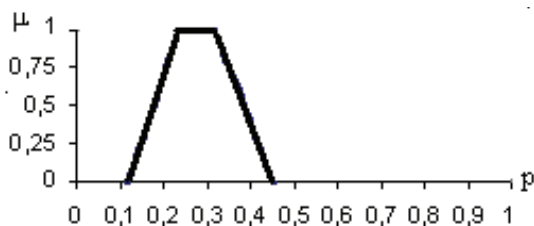


Рис. 6. Результат вычисления оценки вероятности вершинного события при применении операции «И» (конъюнкции)

3. Пример оценки вероятности посадки судна на грунт на основе построения и анализа дерева отказов

Рассмотрим возможность использования методики уровнейных множеств для анализа дерева отказов «Оценка вероятности посадки судна на грунт», представленного на рис. 7.

На рис. 7 использованы следующие обозначения иницирующих и вершинного событий:

X_1 — принятие ошибочного плана прохождения узкости; X_2 — ошибка в принятом плане не найдена; A_1 — выбранный путь является опасным; X_4 — координаты судна определены неточно; X_5 — неверные координаты нанесены на карту; A_3 — дана неверная команда рулевому; X_3 — отклонение от безопасного курса не обнаружено; A_2 — курс изменен в сторону опасности; T — посадка судна на грунт.

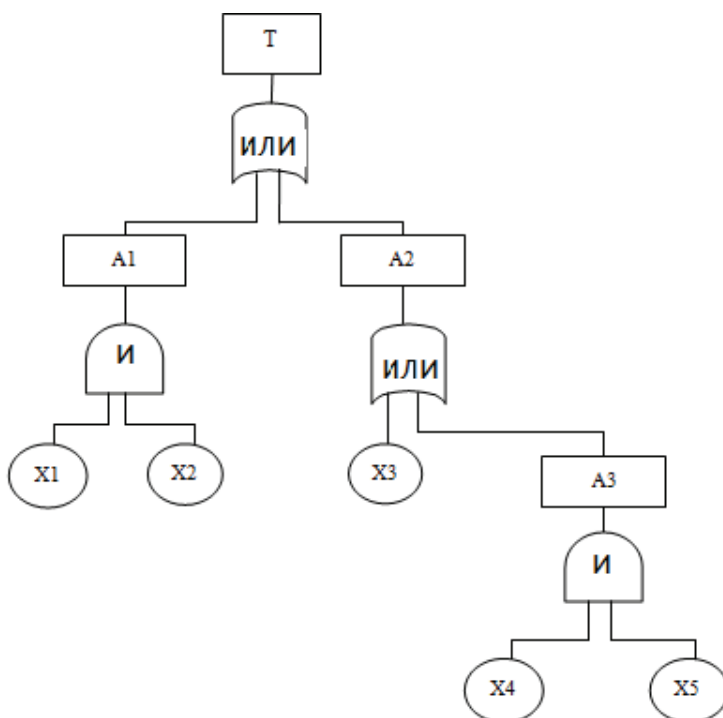


Рис. 7. Дерево отказов «Вероятностный анализ риска посадки судна на мель»

Полагаем, что исходная информация о вероятности инициирующих событий $X_1 \div X_5$ получена в результате анализа экспертных оценок и возможность реализации события определяется как нечеткое множество в виде нечеткого числа в диапазоне $[0,1]$ [5].

Таблица 4

Оценки вероятностей инициирующих событий $X_1 \div X_5$ экспертами в виде нечетких чисел

$\mu(p_i)$	P_{x1}	P_{x2}	P_{x3}	P_{x4}	P_{x5}
0	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	0
1	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$2,15 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	0
1	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$
0	$9,7 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$	$2,95 \cdot 10^{-3}$

Если заданы вероятности P_i событий X_i , то вероятность вершинного события («Посадка на грунт») T равна [4]:

$$P_T(P_1, \dots, P_5) = P_1 P_2 + (1 - P_1 P_2) (P_3 + (1 - P_3) P_4 P_5). \quad (1)$$

Задача оценки возможности реализации вершинного события эквивалентна определению следующей функции:

$$\tilde{P}_T(\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \dots, \tilde{P}_5) = \tilde{P}_1 \tilde{P}_2 + (1 - \tilde{P}_1 \tilde{P}_2) (\tilde{P}_3 + (1 - \tilde{P}_3) \tilde{P}_4 \tilde{P}_5), \quad (2)$$

где $\tilde{P}_i$ — нечеткое число, определяющее вероятность нежелательных событий.

Примем количество уровней дискретизации $k = 10$. Совершая операции над нечеткими числами, аналогичные приведенным в п. 2 данной статьи, мы получаем ответ в виде нечеткого числа, функция принадлежности которого при используемых исходных данных будет представлена в виде трапеции (рис. 8).

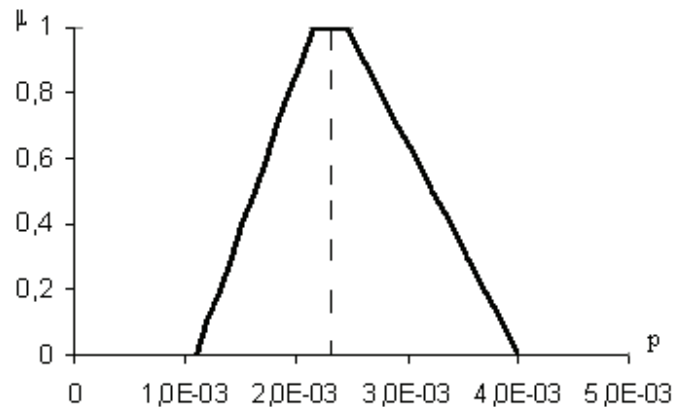


Рис. 8. Оценка вероятности посадки судна на грунт

Функция принадлежности для оценки вероятности посадки судна на грунт имеет трапецевидную форму с параметрами $a = 1,1 \cdot 10^{-3}$, $b = 2,15 \cdot 10^{-3}$, $c = 2,46 \cdot 10^{-3}$, $d = 4,01 \cdot 10^{-3}$.

Таким образом, носителем нечеткого множества полученной оценки, то есть пессимистической оценкой значения вероятности (по принципу «считай себя ближе к опасности»), является интервал значений $[a, d] = [1,1 \cdot 10^{-3}; 4,01 \cdot 10^{-3}]$.

Ядром нечеткого множества полученной оценки, то есть уверенной оценкой значения вероятности, является интервал $[b, c] = [2,15 \cdot 10^{-3}; 2,46 \cdot 10^{-3}]$.

На практике часто применяется переход от нечеткой формы функции принадлежности к четкой (интервальной) форме, используя в качестве интервалов значения переменной на уровне $\mu = 0,5$.

В этом случае интервал значений оценки вероятности посадки судна на грунт имеет значения $[1,625 \cdot 10^{-3}; 3,231 \cdot 10^{-3}]$.

Выбор конкретного значения вероятности посадки судна на грунт зависит от характера решаемых задач.

Выводы

Метод уровневых множеств является удобным и наглядным инженерным инструментом для оценки и анализа показателей риска при использовании метода деревьев отказов. Задание различных форм функций принадлежности при оценке экспертами вероятности (частоты) событий в сочетании со шкалированием квантификаторов позволяет рассмотреть весьма широкий класс представления экспертных оценок в виде нечетких чисел и уменьшить рассогласование между формальной оценкой вероятности нежелательных событий и ее оценкой на основе здравого смысла, что приведет к большей степени правдоподобности оценки риска в мореплавании.

Список литературы

1. ГОСТ Р 51901.13-2005. Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей. — М.: Стандартинформ, 2005.
2. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. — М.: Радио и связь, 1976.
3. Поспелов Д. А. Логико-лингвистические модели в системах управления / Д. А. Поспелов. — М.: Энергоиздат, 1981.
4. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И. А. Рябинин. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2007.
5. Amrozowicz M. A Probabilistic Analysis of Tanker Groundings / M. Amrozowicz, A. J. Brown, M. Golay // 7th International Offshore and Polar Engineering Conference. May, 1997. — Honolulu, Hawaii, 1997.
6. Tanaka H. Fault-Tree Analysis by Fuzzy Probability / H. Tanaka [et al.] // IEEE Trans. Reliability. — 1983. — Vol. R-32, № 5.
7. International Maritime Organization (IMO). Maritime Safety Committee // Formal Safety Assessment, Consolidated text of the Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process / MSC/Circ. 1023–MEPC/Circ. 392. May 2007.
8. International Maritime Organization (IMO). International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, 2011. — L., 2011.