

Научная статья

УДК 656.612.02

<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-2-83-92>

EDN XUQJBN

О вероятностной оценке столкновения судов в открытом море

Дмитрий Валерьевич Алексеев, Александр Андреевич Лентарев[✉]

*Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Россия, lentarev@msun.ru[✉]*

Аннотация. Представлена аналитическая модель оценки вероятности столкновения судов в открытом море. Модель основана на подходах классической теории вероятностей, когда столкновение представляет собой итог последовательного возникновения ряда случайных событий, возникающих при развитии схемы «сближение – встреча – столкновение». Каждое из этих событий характеризуется совокупностью непрерывных случайных величин, законы распределения и параметры которых могут выбираться в зависимости от конкретных навигационных условий. Критическим элементом модели является возможный переход от ситуации встречи судов к их столкновению, определяемый казуальной вероятностью. При таком подходе схема «сближение – встреча – столкновение» становится одним из вариантов схемы «опасность – реальная опасность – реализованная опасность», применяемой в процедурах оценки и управления рисками. В этом случае ситуация встречи двух судов является реальной опасностью и рассматривается как потенциально опасная ситуация по терминологии формализованной оценки безопасности, принятой в мореплавании при анализе и оценки рисков. Модель позволяет получать как единичные, так и интервальные оценки вероятности столкновения. Модель может быть использована для оценки уровня безопасности плавания для конкретных условий навигации и характеристик судоходства путем изменения входных данных: вид и параметры функций плотности распределения курсов и скоростей судов, размеры анализируемой акватории, параметры используемых в модели критериев безопасности. Представленная модель может быть полезна при оценке рисков разливов нефти, возникающих в результате возможных столкновений судов, что является обязательным элементом при формировании системы предупреждения и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на море.

Ключевые слова: встреча судов, столкновение судов, зона навигационной безопасности, случайная величина, функция плотности распределения, вероятностная модель, разлив нефти

Для цитирования: Алексеев Д. В., Лентарев А. А. О вероятностной оценке столкновения судов в открытом море // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2025. № 2. С. 83–92. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-2-83-92>. EDN XUQJBN.

Original article

On the probabilistic assessment of ship collisions in the open sea

Dmitrij V. Alekseev, Alexandr A. Lentarev[✉]

*Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russia, lentarev@msun.ru[✉]*

Abstract. The article presents an analytical model for assessing the probability of collision of vessels in the open sea. The model is based on the approaches of classical probability theory, when a collision is a result of a sequential occurrence of a number of random events occurring during the development of the “approach – encounter – collision” scheme. Each of these events is characterized by a set of continuous random variables, the distribution laws and parameters of which can be selected depending on specific navigation conditions. The critical element of the model is the possible transition from the situation of meeting of ships to their collision, determined by the causal probability. With this approach, the scheme “approach – meeting – collision” is one of the variants of the scheme “danger – real danger – realized danger”, applied in the procedures of risk assessment and management. In this case, the situation of meeting of two ships is a real danger and is considered as a potentially dangerous situation according to the terminology of formal safety assessment adopted in navigation during risk analysis and assessment. The model allows obtaining both single and interval estimates of the collision probability. The model can be used to assess the level of navigation safety for specific navigation conditions and shipping characteristics by changing the input data: the type and

parameters of the functions of the density of distribution of courses and speeds of vessels, the size of the analyzed water area, the parameters of the safety criteria used in the model. The presented model can be useful in assessing the risks of oil spills arising from possible collisions of vessels, which is an obligatory element in the formation of a system for preventing and responding emergency spills of oil and oil products at sea.

Keywords: ships encounter, ships collision, ship domain, random variable, distribution density function, probability model, oil spill

For citation: Alekseev D. V., Lentarev A. A. On the probabilistic assessment of ship collisions in the open sea. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies.* 2025;2:83-92. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-2-83-92>. EDN XUQJBN.

Введение

Несмотря на широкое внедрение на флоте передовых технологий судовождения, в условиях постоянно растущего объема морских перевозок навигационная аварийность остается достаточно значимым фактором, определяющим состояние безопасности мореплавания. Поэтому снижение уровня навигационной аварийности, значительную часть которой составляют столкновения судов, остается актуальной проблемой, имеющей комплексный характер, включающий теоретическую, нормативно-организационную, технологическую и прикладную составляющие. Одним из элементов теоретических исследований в области обеспечения безопасности мореплавания является разработка моделей оценки вероятности столкновений судов. В данной работе под термином «модель» имеется в виду формула (система формул) или аналитическая процедура, с помощью которой можно получить количественную оценку вероятности столкновения.

Проблема количественной оценки вероятности столкновения судов начала активно разрабатываться с середины 1960-х гг. В хронологическом аспекте первой в истории отечественной морской инженерии была модель профессора С. Б. Ольшамовского, разработанная на основе изучения характера движения судов на внутренних водных путях [1]. Однако на первом этапе основная заслуга в разработке аналитических моделей навигационных аварий принадлежит японским ученым. Они впервые теоретически обосновали существование вокруг судна зоны, свободной от других судов, объектов и прочих препятствий, обеспечивающей безопасное плавание, которая получила название зоны навигационной безопасности (ЗНБ) [2]. В англоязычном варианте эквивалентным ЗНБ является термин *ship domain*. Именно концепция ЗНБ используется во многих моделях оценки вероятности столкновения судов или посадки на мель. Существующие модели основаны на разных подходах. Например, К. Хара предложил две модели: первая основана на положениях теории массового обслуживания, а вторая – на кинематических положениях о движении двух взаимодействующих судопотоков и их статистических параметрах [3, 4]. Тра-

диционные кинематические соотношения, характеризующие движение судов, также использовались в моделях Е. Чена и Дж. Льюисона [5, 6]. Исследователи Е. Гудвин и Дж. Кемп при разработке своей модели ввели понятие «геометрическое столкновение» как промежуточный этап в развитии процесса «сближение – столкновение» [7]. Немецкий ученый К. Х. Квик предложил модель расчета вероятности столкновений, разработанную на основе методики, используемой в различных областях рациональной оценки надежности. В этой модели фактическое поведение капитана соответствует «надежности», а необходимый маневр по уклонению от столкновения соответствует «требованию» [8]. В ряде работ А. К. Дебната, Х. Ч. Чина и М. Хейга дается теоретическое обоснование и возможность практического применения биноминальной логистической модели вероятности столкновения, которая учитывает 20 переменных, влияющих на движение судов: характеристики водного пути (границы и размеры, наличие средств навигационного оборудования, конфигурация фарватеров и т. п.); параметры движения (интенсивность и плотность движущихся судов и судов на якоре, скорость движения); время суток (день, ночь) [9, 10]. Методы теории нечетких множеств использовал в своих моделях безопасности движения групп судов В. М. Гриняк [11]. Оригинальный подход на основе стохастической геометрии применен в модели, представленной в работе [12].

В специальной литературе можно найти информацию о еще почти двух десятках разнообразных моделей вероятности столкновения судов. Кроме того, для решения проблем безопасности мореплавания используются различные статистические и индексные оценки вероятности столкновения. Краткий анализ таких моделей и оценок представлен в монографии [13].

Некоторые из теоретических моделей вероятности столкновения судов нашли реальное практическое применение. Например, биноминальная логистическая модель использовалась при формировании существующей портовой структуры в Сингапуре [14]. Модели, разработанные японскими учеными, легли в основу известных компьютерных про-

грамм IWRAP (IALA Waterway Risk Assessment Program – Программа Международной ассоциации маячных служб (МАМС) по оценке риска на водных путях) и PASWA (IALA Ports and waterways safety assessment – Программа оценки безопасности в портах и на водных путях). Эти программы разработаны в МАМС и применяются для создания оптимальных схем движения. В частности, рекомендации, сформированные с помощью этих программ, реализованы в Сан-Франциско, Ричмонде, Окленде, Сакраменто, Стоктоне и других портах.

Большинство из существующих теоретических моделей вероятности столкновения судов разработаны для конкретных условий судоходства с использованием определенных ограничений. Возможные области использования таких моделей включают в себя предупреждение столкновений судов в море, обеспечение безопасности плавания в зонах систем управления движением судов, разработку эффективных схем организации движения судов. Задача определения вероятности столкновения судов как одной из составляющих навигационной аварийности решается также при оценке риска разливов нефти и нефтепродуктов на море, необходимой для формирования системы предупреждения и ликвидации таких разливов любого уровня, что требуется действующими нормативными документами. В реальности же при решении этой проблемы применяются лишь статистические и/или индексные оценки вероятности столкновений, которые далеко не всегда отражают реальный уровень безопасности мореплавания в том или ином районе, поскольку они основаны на предыдущих статистических данных об аварийности в других районах. В связи с этим цель настоящей работы заключается в разработке такой модели вероятности столкновения судов, которая была бы удобна для использования в процедурах оценки риска разливов нефти на море при формировании системы предупреждения и ликвидации таких разливов.

Постановка задачи

Прежде чем перейти к определению вероятности столкновения судов, следует уточнить важные терминологические понятия. Столкновение двух судов является итогом процесса, эволюция которого проходит по схеме «сближение – чрезмерное сближение (встреча) – столкновение». В этой схеме термины «сближение» и «столкновение» понимаются достаточно просто: сближение двух судов – это такое относительное движение судов, когда расстояние между ними уменьшается, а столкновение – это динамический контакт двух судов. Что касается ситуации чрезмерного сближения, то в практике

судовождения принято считать, что такая ситуация возникает, когда встречное судно приближается на определенное расстояние $D_{зад}$, которое задается судоводителем исходя из условия обеспечения безопасности плавания (в открытом море, как правило, от 2 до 5 миль). В то же время при анализе процесса сближения судов важнейшим понятием является расстояние кратчайшего сближения D_{kp} , определяемое перпендикуляром из места своего судна на линию относительного движения (ЛОД) (рис. 1).

В этом случае можно считать, что ситуация чрезмерного сближения наступит, когда будет соблюдено условие $D_{kp} \leq D_{зад}$. Это условие возникает, если ЛОД проходит через круг, проведенный радиусом $D_{зад}$ вокруг своего судна. Часто ситуация чрезмерного сближения называется ситуацией встречи (в англоязычной литературе используется термин *encounter*). При анализе ситуации сближения судов использование параметра $D_{зад}$ позволяет в диапазоне пересекающихся курсов ($D_{kp} > D_{зад}$) выделить сегмент встречных курсов ($D_{kp} \leq D_{зад}$). В обычной практике судовождения ситуация чрезмерного сближения или встречи не допускается: судоводители заблаговременно обнаруживают возможность такой ситуации, рассчитывают и выполняют маневр по расхождению со встречным судном. Представленный взгляд на ситуацию чрезмерного сближения характерен для задачи предупреждения столкновения судов.

Для целей данной работы эту проблему следует также рассмотреть в категориях рисков, связанных с навигационной аварийностью.

С точки зрения ноксологии – науки, занимающейся анализом эволюции опасностей – процесс «сближение – чрезмерное сближение (встреча) – столкновение» соответствует принятой модели развития опасности, выражаемой в виде «потенциальная опасность – реальная опасность – реализованная опасность» [15]. Следовательно, столкновению обязательно предшествует ситуация встречи, или реальная опасность в терминах ноксологии. В мореплавании такая ситуация называется потенциально-опасной ситуацией (near-miss), как определено в Циркуляре ИМО MSC-MEPC.7/Circ.7 от 10 октября 2010 г., разработанном совместно с Комитетом по безопасности мореплавания и Комитетом по охране окружающей среды с целью реализации требований Международного кодекса по управлению безопасностью [16]. С практической точки зрения каждая встреча двух судов связана с необходимостью расчета и выполнения маневра по уклонению от столкновения, по крайней мере, одним из судов.

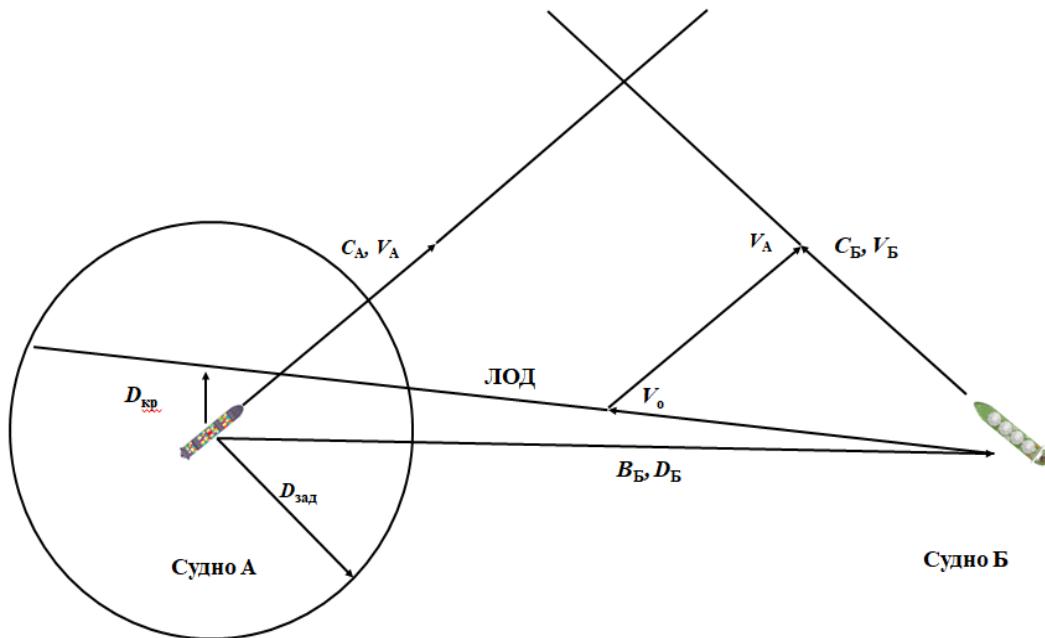


Рис. 1. Ситуация чрезмерного сближения (встречи) двух судов

Fig. 1. The situation of excessive convergence (meeting) of two vessels

С позиций вероятностного подхода, который наиболее часто используется при оценке и анализе рисков, столкновение двух судов может произойти при последовательном возникновении двух событий: *a*) суда оказались в ситуации встречи; *b*) суда (или одно из них) не предприняли мер по уклонению от столкновения или предпринятые меры оказались недостаточными или неэффективными. Второе событие связано с влиянием так называемого человеческого фактора, который, по статистике ИМО, в 96 % случаев является первопричиной столкновений. Для анализа влияния человеческого фактора в научной литературе введен специальный термин causation probability, который в русскоязычных работах переводится как «казуальная вероятность» [17]. В классической теории вероятностей этому понятию более всего соответствует термин «условная вероятность».

Если известна вероятность указанного выше события *a*, т. е. вероятность встречи двух судов $P_{\text{в}}$ и вероятность события *b*, определяемого казуальной вероятностью P_{k} , то вероятность столкновения $P_{\text{ст}}$ в общем виде можно представить следующим выражением:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{k}} P_{\text{в}}. \quad (1)$$

Таким образом, при оценке вероятности столк-

новения судов в море ключевой является задача определения вероятности встречи этих судов, которая определяется главным образом кинематическими и динамическими параметрами, характеризующими процесс движения судов. Далее предпринята попытка решить эту задачу на основе использования методов теории вероятностей. Оценка влияния человеческого фактора в виде казуальной вероятности выходит за рамки данной работы.

Формализация модели вероятности встречи судов

Рассмотрим модель судопотока (движения судов), когда суда находятся в открытом море при отсутствии каких-либо элементов внешнего регулирования движения (системы разделения, рекомендованные пути, районы с особым режимом плавания и т. п.). Пример такого судопотока представлен на рис. 2, где показан фрагмент карты с сайта Marine Traffic 04.03.2025.

Задача, поставленная в данной работе, применительно к этой карте заключается в определении вероятности встречи своего судна А (выделено кружком) с другими судами Б, которые расположены вокруг случайным образом и движутся в разных направлениях с различными скоростями.

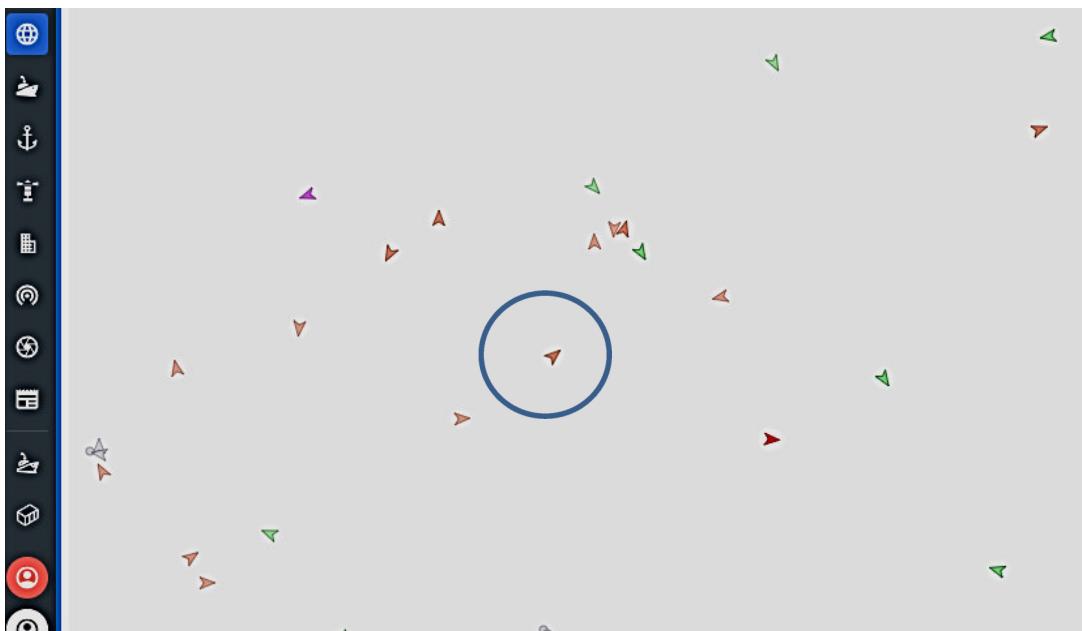


Рис. 2. Фрагмент карты с сайта Marine Traffic 04.03.2025 к западу от побережья Перу

Fig. 2. Map fragment from the MarineTraffic website 03/04/2025 west of the coast of Peru

Для анализа этой ситуации можно использовать модель, основанную на использовании инструментов классической теории вероятности. В такой модели характер движения судов определяется набором параметров, являющихся непрерывными случайными величинами, распределенными по тому или иному закону. Основными из них являются такие параметры, как пеленг B и расстояние D , на которых другие суда расположены относительно своего судна, а также курс C_B и скорость V_B этих судов (см. рис. 1). В данной ситуации случайная природа судопотока дает основания полагать, что эти параметры имеют следующие распределения:

- пеленг B – равномерное в диапазоне от 0° до 360° ;
- расстояние D – равномерное в диапазоне от D_{\min} до D_{\max} . Диапазон изменения величины D может быть определен от $D_{\text{кр}}$ (расстояние кратчайшего сближения) до максимального размера рассматриваемого водного пути. Параметр D определяет такую важную характеристику судопотока, как плотность ρ , равную количеству судов, приходящихся на единицу площади (или длины) водного пути;
- курс C_B – равномерное в диапазоне от 0° до 360° ;
- скорость V_B – распределена по нормальному закону, параметры которого меняются в зависимости от специфики района плавания.

Поскольку в этой модели судопотока движение судов имеет случайный характер, то судно Б может появиться по любому направлению и на любом

расстоянии относительно судна А. Вокруг своего судна существует ЗНБ, определяемая расстоянием $D_{\text{зад}}$, на котором суда расходятся в открытом море, выполняя маневр по уклонению от столкновения. В обычной практике судно расходится с другим судном на одном и том же расстоянии независимо от курсового угла, на котором находится это судно. Поэтому в этом случае ЗНБ имеет форму круга радиусом $R_{\text{ЗНБ}}$, т. е. $D_{\text{зад}} = R_{\text{ЗНБ}}$. Ситуация встречи возникнет тогда, когда ЛОД пройдет через ЗНБ.

Для того чтобы ЛОД прошла через ЗНБ, встречное судно должно идти конкретным курсом с конкретной скоростью, которые обозначим $C_{B(e)}$ и $V_{B(e)}$ соответственно. Таким образом, ситуация встречи произойдет при одновременном возникновении четырех событий:

- встречное судно появилось по пеленгу B_B , вероятность которого обозначим как $P_{B(B)}$;
- встречное судно появилось на расстоянии D_B с вероятностью $P_{D(B)}$;
- курс встречного судна равен $C_{B(e)}$ с вероятностью $P_{C(Be)}$;
- скорость встречного судна равна $V_{B(e)}$ с вероятностью $P_{V(Be)}$.

В таком случае вероятность встречи P_v будет определяться следующим общим выражением:

$$P_v = P_{B(B)} P_{D(B)} P_{C(Be)} P_{V(Be)}. \quad (2)$$

Таким образом, выражение (2) представляет общую модель вероятности встречи двух судов в море.

Рассмотрим особенности оценки четырех составляющих уравнения (2), являющихся вероятностями четырех событий, связанными с непрерывными случайными величинами B , D , $C_{\text{Б}}$ и $V_{\text{Б}}$. При этом необходимо разрешить известное в теории вероятностей противоречие, которое заключается в том, что вероятность любого отдельного значения непрерывной случайной величины равна нулю, тогда как случайная величина может принимать отдельные значения. Например, пеленг B , на котором появляется встречное судно, может быть равен, допустим, 118° , однако вероятность такого значения, по теории вероятностей, равна нулю. Для разрешения этого противоречия в теории вероятностей введено понятие элемента вероятности для отдельного значения непрерывной случайной величины, которое означает вероятность попадания случайной величины в некоторый диапазон (α, β) . Элемент вероятности рассчитывается следующим образом [18]:

$$P\{\alpha < X < \beta\} = \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx, \quad (3)$$

где X – непрерывная случайная величина; x – отдельное значение величины X ; $f(x)$ – функция плотности распределения величины X ; α и β – пределы изменения величины X . При выборе пределов изменения рассматриваемых случайных величин нужно учитывать реальную практику судовождения. Так, в случае пеленга пределы изменения могут задаваться точностью $\pm 0,5^\circ$, с которой все направления (курсы и пеленги) фиксируются в судовой документации. Можно также использовать показатели точности измерения тех технических средств, которые применяются для измерения пеленгов.

В общем случае пеленг B распределен равномерно в диапазоне от 0° до 360° , его функция плотности распределения имеет следующий вид (размерность пеленга в градусах опускаем):

$$f(B) = \begin{cases} \frac{1}{360} & \text{при } B \in (360, 0), \\ 0 & \text{при } B \not\in (360, 0). \end{cases} \quad (4)$$

Следовательно, составляющая $P_{B(\text{Б})}$ выражения (2) определяется с помощью интегрирования уравнения (4) в выбранных пределах, зависящих от точности измерения величины B .

Вторая составляющая уравнения (2) – вероятность $P_{D(\text{Б})}$ – связана с расстоянием D , пределы изменения которого зависят от размеров ЗНБ и анализируемой морской акватории. Принятые в модели размеры круговой ЗНБ определяют минимальное значение параметра D , т. е. $D_{\min} = R_{\text{ЗНБ}}$, поскольку в обычной практике суда не допускают попадания других судов в свою ЗНБ. Максимальное значение D_{\max} определяется целями решаемой

задачи. При гипотезе о равномерном распределении плотности судопотока плотность распределения случайной величины D представляется в виде следующего уравнения:

$$f(D) = \begin{cases} \frac{1}{D_{\max} - D_{\min}} & \text{при } D \in (D_{\max}, D_{\min}), \\ 0 & \text{при } D \not\in (D_{\max}, D_{\min}). \end{cases} \quad (5)$$

Тогда вероятность $P_{D(\text{Б})}$ получается путем интегрирования уравнения (5) в пределах, которые определяются точностью выбранного метода измерения параметра D .

Третья составляющая уравнения (2) – вероятность $P_{C_{\text{Б}(e)}}$ – связана с курсом встречного судна $C_{\text{Б}(e)}$, который, как и пеленг B , распределен равномерно в диапазоне от 0° до 360° с функцией плотности распределения, выражаемой уравнением (4). Поэтому величина $P_{C_{\text{Б}(e)}}$ определяется интегрированием уравнения (4) в пределах, которые зависят от точности применяемого способа измерения $C_{\text{Б}(e)}$. Реалистичность представленной модели можно увеличить, если учесть, что $P_{C_{\text{Б}(e)}}$ – это вероятность отдельного значения курса встречного судна $C_{\text{Б}(e)}$, ведущего к возникновению ситуации встречи, т. е. пересечения ЛОД и круговой ЗНБ. На самом деле пересечение ЛОД и ЗНБ возникает, когда курс встречного судна $C_{\text{Б}(e)}$ находится в диапазоне углов, ограниченных касательными, проведенными из места этого судна к обеим сторонам круговой ЗНБ. Этот диапазон углов определяется как

$$\theta = \arctg(R_{\text{ЗНБ}}/D_{\text{Б}}).$$

Поэтому расчетное значение $P_{C_{\text{Б}(e)}}$ следует умножать на коэффициент, равный углу θ . При вероятностных расчетах возможно использование среднего значения угла θ , который представляет собой непрерывную случайную величину, являющуюся функцией от другой случайной величины $D_{\text{Б}}$. Среднее значение (математическое ожидание) угла θ в общем виде будет определяться следующим выражением [19]:

$$M[\theta] = M[\varphi(Y)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(y) f(y) dy.$$

При равномерном распределении $D_{\text{Б}}$ функция $f(y)$ определяется как

$$f(D_{\text{Б}}) = \begin{cases} \frac{1}{D_{\max} - D_{\min}} & \text{при } D_{\text{Б}} \in (D_{\max}, D_{\min}), \\ 0 & \text{при } D_{\text{Б}} \not\in (D_{\max}, D_{\min}). \end{cases} \quad (6)$$

Тогда с учетом функции (6) математическое ожидание угла θ определяется следующим образом:

$$M[\theta] = \frac{1}{D_{\max} - D_d} \int_{D_d}^{D_{\max}} \arctg \frac{1}{t} d(t), \quad (7)$$

где $t = D_B / 2$. Значение $M[\theta] = \theta_{cp}$ получается традиционным методом интегрирования уравнения (7) по частям и последующей заменой переменной.

Аналогичным образом можно учесть и тот фактор, что встречное судно, следя отдельным курсом, может оказаться в ситуации встречи, если его скорость будет в некотором диапазоне изменения, обеспечивающем пересечение ЛОД круговой ЗНБ.

где V_B – любое отдельное значение этого параметра (скорости встречного судна); σ – среднее квадратичное отклонение случайной величины V_B ; m – математическое ожидание случайной величины V_B ; $\pm \Delta V$ – точность измерения V_B .

Результаты исследования

На этапе формализации предлагаемой модели установлено, что вероятность встречи судна А и судна Б в открытом море P_B в общем виде определяется уравнением (2), в которое входят четыре составляющих:

- вероятность того, что судно Б появится по пеленгу B относительно судна А – $P_{B(B)}$;
- вероятность того, что судно Б появится на расстоянии D относительно судна А – $P_{D(B)}$;
- вероятность того, что курс судна Б окажется равным $C_{B(e)}$, при котором возникнет ситуация встречи, когда ЛОД проходит через ЗНБ судна А – $P_{C(B)}$;
- вероятность того, что скорость судна Б окажется равной $V_{B(e)}$, при которой возникнет ситуация встречи, когда ЛОД проходит через ЗНБ судна А – $P_{V(B)}$.

Эти составляющие получаются путем интегрирования в соответствующих пределах уравнений (4), (5) и (8). Проблема заключается в выборе пределов интегрирования. При этом целесообразно исходить из фактических действий судоводителей, от которых зависит реально складывающаяся навигационная обстановка в море. Так, при выборе пределов интегрирования уравнения (4) для получения количественной оценки $P_{B(B)}$ рекомендуется использовать точность измерения пеленгов ($\pm 1 \div 1,5^\circ$), характерную для судовых радаров, поскольку именно радиолокационные пеленги используются при решении задач по предупреждению столкновения судов как в ручном (маневренный планшет), так и в автоматическом режиме (средства автоматической радиолокационной прокладки). Для современных судовых радиолокационных станций эта точность находится в пределах $\pm 1 \div 1,5^\circ$. Тогда при

Несколько сложнее получить количественную оценку четвертой составляющей уравнения (2) – вероятности $P_{V(B)}$. Правомерно допустить, что в случайному судопотоке скорости движения судов подчиняются нормальному закону распределения [15] (в регулируемых судопотоках распределение скоростей судов может быть иным). В случае нормального распределения скоростей встречных судов при их измерении с точностью $\pm \Delta V$ использование общего выражения (3) дает следующую формулу для расчета $P_{V(B)}$:

$$P_{V(B)} \{V_B - \Delta V < V_B < V_B + \Delta V\} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{V_B - \Delta V}^{V_B + \Delta V} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dV_B, \quad (8)$$

пределах интегрирования уравнения (4), равных $\pm 1,5^\circ$, значение $P_{B(B)}$ будет составлять 1/120.

Такой же подход правомерен и при оценке значения $P_{D(B)}$. Точность измерения расстояний современных судовых радаров составляет примерно 1 % от номинала рабочей шкалы. Например, при работе на 48-мильной шкале точность измерения расстояния составит около $\pm 0,48$ мили независимо от положения эхо-сигнала встречного судна на экране радара. Тогда, интегрируя уравнение (5) в пределах $\pm 0,5$ при значениях $D_{\min} = 2$ мили и $D_{\max} = 40$ миль, получаем $P_{D(B)} = 1/38$.

Для формализации процедуры расчета $P_{C(B)}$ целесообразно ввести понятие зоны действий D_d , в которой судоводитель выполняет маневр по уклонению от чрезмерного сближения, обоснование которой дается в работе Г. Н. Шарля [20]. Для открытого моря радиус такой зоны рекомендуется принимать равным 8 милям. В таком случае при $R_{ZNB} = 2$ мили и $D_{\max} = 40$ миль в диапазоне расстояний до встречного судна от 8 до 40 миль значение угла θ будет находиться в пределах от 14° до 3° . Соответственно, величина $P_{C(B)}$ будет составлять от 14/120 до 3/120. При вероятностных расчетах возможно использование среднего значения угла θ , который представляет собой непрерывную случайную величину, являющуюся функцией от другой случайной величины D_B . Это значение получается решением уравнения (7), и если выбрать пределы интегрирования от $D_d = 8$ миль до $D_{\max} = 40$ миль, то $\theta_{cp} \approx 8^\circ$. Затем путем интегрирования уравнения (5) в пределах от $D_{\min} = 2$ мили до $D_{\max} = 40$ миль с учетом $\theta_{cp} \approx 8^\circ$ получаем $P_{C(B)} = 8/120$.

Наконец, вероятность $P_{V(B)}$ определяется уравнением (8) и зависит от выбранных параметров нормального распределения: математическое ожидание (среднее значение) m и среднее квадратичное отклонение σ . Симметричность нормального распределения дает основания полагать, что при вероятностных расчетах правомерным будет использование среднего значения $V_{B(e)}$, которое,

например, при $m = 15$ уз, $\sigma = 3$ уз и $\Delta V = \pm 0,1$ уз равно 0,031.

При указанных выше расчетных значениях составляющих уравнения (2) получаем $P_v = 4,5 \cdot 10^{-7}$. Уточним, что это значение определяет вероятность того, что судно встретится с каким-либо одним судном, находящимся вокруг него в зоне радиусом $D_{\max} = 40$ миль, при указанных в тексте условиях и принятых к расчету значениях параметров, входящих в используемые уравнения. Если на этой акватории находится N судов, то для определения вероятности того, что любое судно окажется в ситуации встречи хотя бы с одним из этих судов, рассчитанное таким образом значение следует умножить на N . Кроме того, если расчетное значение P_v умножить на $N(N + 1)/2$, то получим вероятность того, что произойдет хотя бы одна встреча любой пары из N находящихся на акватории судов.

Обсуждение результатов

Следует подчеркнуть, что представленная модель не учитывает такой важный для безопасности плавания параметр, как время. Практически это означает, что потенциальная встреча двух судов, определенная по критерию $D_{\text{кр}} \leq D_{\text{зад}} = R_{\text{ЗНБ}}$, может произойти за пределами рассматриваемой акватории. Учет времени в данной модели потребует ввода в нее случайных величин, являющихся достаточно сложными функциями нескольких других случайных величин, что в свою очередь ведет к появлению в модели комплексных тройных интегралов, как показано в работе [13]. В этом случае прямое аналитическое решение уравнений модели невозможно, и проблема может быть решена только на основе использования метода статистических испытаний (метод Монте-Карло).

Кроме того, в модели не учитываются размеры судов, попадающих в ситуацию встречи. Однако эта особенность характерна для большинства существующих моделей столкновения судов. Такой подход является приемлемым, поскольку модель не предназначена для решения задач по уклонению от столкновения судов.

Рассчитанную таким образом вероятность встречи судов можно использовать для оценки вероятности столкновения, представленной в виде уравнения (2). В свою очередь, вероятность столкновения может быть использована для оценки вероятности разливов нефти нефтепродуктов, расчет которой является обязательным элементом процедуры оценки рисков таких разливов в результате судоходства. В диаде «столкновение – разлив нефтепродукта» переход от первого элемента ко второму аналогичен ситуации «встреча – столкновение», в которой такой переход определяется казуальной вероятностью (см. уравнение (1)), рассчитываемой

на основе анализа статистики навигационной аварийности. Применительно к разливам нефти на море, произошедшем в результате судоходной деятельности, такой подход представлен, например, в работе Т. К. С. Куона и Дж. Е. Бушелла [21], где на основе результатов анализа статистических данных по столкновениям судов в канадских водах получены количественные оценки (по сути – казуальные вероятности), определяющие, какая часть столкновений приводит к разливам нефти и нефтепродуктов. Для современного состояния судоходства эта проблема требует отдельного исследования.

При анализе риска, вероятности и ущерба от аварийных происшествий обычно используется матричная форма измерения этих параметров, в основе которой лежат не единичные, а интервальные оценки. Например, в РД 03-418-01 «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов» представлена классификация аварийных происшествий по вероятности возникновения:

- частые события – вероятность: более 1 события в год на 1 объекте;
- вероятные события – вероятность: более 1 события в течение 1–100 лет ($1 \cdot 100 - 10^{-2}$) или более 1 события в год на объектах количеством до 100;
- возможные события – вероятность: более 1 события в течение 100–10 000 лет ($1 \cdot 10^{-2} - 10^{-4}$) или более одного события в год на 100–10 000 объектах;
- редкие события – вероятность: более 1 события в течение 10 000–1 000 000 лет ($1 \cdot 10^{-4} - 10^{-6}$) или более одного события в год на 10 000–1 000 000 объектах;
- практически невероятные события – вероятность: более одного события за время более 1 000 000 лет ($< 1 \cdot 10^{-6}$) или более одного события в год на более чем 1 000 000 объектах.

Представленная модель также позволяет получать интервальные оценки вероятности столкновения судов, которые являются более достоверными, чем отдельные оценки.

Заключение

Действующим законодательством предусматривается создание и функционирование системы предупреждения и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на море. При формировании такой системы обязательным этапом является оценка рисков, процедура которой включает определение вероятности аварийных случаев, ведущих к разливам нефти, в том числе и столкновений судов. В то же время методики оценки вероятности столкновений судов пока не существует. На практике для этой цели используются различные статистические и индексные показатели.

Представленная модель основана на применении подходов классической теории вероятностей к ситуации встречи двух судов в открытом море, являющейся исходным элементом диады «встреча – столкновение». Эта модель позволяет достаточно просто получить ряд показателей, характеризующих уровень навигационной безопасности на конкретной акватории (например, вероятность столкновения конкретного судна с любым другим судном, вероятность столкновения любой пары судов, общая вероятность столкновения судов на данной

акватории, расчетное количество возможных столкновений при заданной плотности движения судов и т. п.). Причем такие показатели могут быть как единичными, так и интервальными. В модель входит ряд переменных элементов – вид и параметры функций плотности распределения курсов и скоростей судов, размеры и форма ЗНБ, изменения которые можно получить соответствующие оценки безопасности для конкретных акваторий и условий плавания.

Список источников

1. Ольшамовский С. Б. Вероятностные закономерности потока морских судов. Новороссийск: Изд-во НВИМУ, 1988. 68 с.
2. Fujii Y., Seki M., Tanaka K., Yamada K., Watanabe K. Effective areas of ships // Journal of Nautical Society of Japan. 1966. № 35. Р. 71–86.
3. Хара К., Иноэ К. Вероятность столкновения в имитационной системе предупреждения столкновения судов // Журн. Япон. о-ва гидрограф. наук. 1974. № 96. С. 496–509.
4. Хара К. О методе определения вероятности столкновения судов в произвольно взятых районах // Журн. Япон. о-ва гидрограф. наук. 1971. № 96. С. 32–37.
5. Chen E. Risk Analysis for Marine Transportation // Transportation Research Record. 1978. N. 669. P. 24–27.
6. Lewison G. R. G. The Modelling of Marine Traffic Flow and Potential Encounters. Symposium on Mathematical Aspects of Marine Traffic. London: Institute of Mathematics and its Applications, 1977. 33 p.
7. Goodwin E., Kemp J. A Ship encounter – Collision Model. Localization and Orientation in Biology and Engineering. Berlin e. a.: Springer, 1984. V. XIV. P. 270–274.
8. Kwik K. H. Collision Rate as a Danger Criterion for Marine Traffic // Safety at Sea. 1986. V. 3. N. 2. P. 203–212.
9. Debnath A. K., Chin A. C. Navigational Traffic Conflict Technique: A Proactive Approach to Quantitative Measurement of Collision Risks in Port Waters // The Journal of Navigation. 2010. V. 63. N. 1. P. 137–152.
10. Debnath A. K., Chin A. C., Hague M. Modelling Port Water Collision Risk Using Traffic Conflicts // The Journal of Navigation. 2011. V. 64. N. 4. P. 645–655.
11. Гриняк В. М. Разработка математических моделей обеспечения безопасности коллективного движения морских судов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Владивосток, 2016. 34 с.
12. Бураковский Е. П., Бураковский П. Е., Дмитровский В. А. Математическая модель оценки риска столкновения в потоке судов с произвольным направлением движения // Мор. интеллектуал. системы. 2018. № 4-3 (42). С. 11–18.
13. Лентарёв А. А. Основы теории управления движением судов. Владивосток: Изд-во МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2018. 194 с.
14. Debnath A. K., Chin A. C., Hague M. Modelling Port Water Collision Risk Using Traffic Conflicts // The Journal of Navigation. 2011. V. 64. N. 4. P. 645–655.
15. Лентарёв А. А. Оценка рисков в судовождении. Владивосток: Изд-во МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2022. 143 с.
16. International Maritime Organization (IMO). Guidance on Near-Miss Reporting. MSC-MEPC 7/Circ. 7, October. 2008. 6 p.
17. Официальный сайт Международной ассоциации морских средств навигации и маячных служб. URL: https://www.iala-aism.org/wiki/iwrap/index.php?title=Main_Page (дата обращения: 16.03.2025).
18. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.
19. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учеб. М.: Кнорус, 2010. 664 с.
20. Шарлай Г. Н. МППСС-72 с комментариями. Владивосток: Изд-во МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2017. 134 с.
21. Quon T. K. S., Bushell G. E. Modelling navigational risk and oil spill probabilities // The Journal of Navigation. 1994. N. 3 (47). P. 390–403.

References

1. Ol'shamovskii S. B. *Veroiatnostnye zakonomernosti potoka morskikh sudov* [Probabilistic patterns of marine vessel flow]. Novorossiisk, Izd-vo NVIMU, 1988. 68 p.
2. Fujii Y., Seki M., Tanaka K., Yamada K., Watanabe K. Effective areas of ships. *Journal of Nautical Society of Japan*, 1966, no. 35, pp. 71-86.
3. Khara K., Inoue K. *Veroiatnost' stolknoveniiia v imitatsionnoi sisteme preduprezhdeniiia stolknoveniiia sudov* [The probability of a collision in a simulated ship collision warning system]. *Zhurnal Iaponskogo obshchestva gidrograficheskikh nauk*, 1974, no. 96, pp. 496-509.
4. Khara K. O metode opredeleniiia veroiatnosti stolknoveniiia sudov v proizvol'no vziatykh raionakh [On the method of determining the probability of ship collisions in randomly selected areas]. *Zhurnal Iaponskogo obshchestva gidrograficheskikh nauk*, 1971, no. 96, pp. 32-37.
5. Chen E. Risk Analysis for Marine Transportation. *Transportation Research Record*, 1978, no. 669, pp. 24-27.
6. Lewison G. R. G. *The Modelling of Marine Traffic Flow and Potential Encounters. Symposium on Mathematical Aspects of Marine Traffic*. London, Institute of Mathematics and its Applications, 1977. 33 p.
7. Goodwin E., Kemp J. *A Ship encounter – Collision Model. Localization and Orientation in Biology and Engi-*

- neering. Berlin e. a., Springer Publ., 1984. Vol. XIV. Pp. 270-274.
8. Kwik K. H. Collision Rate as a Danger Criterion for Marine Traffic. *Safety at Sea*, 1986, vol. 3, no. 2, pp. 203-212.
9. Debnath A. K., Chin A. C. Navigational Traffic Conflict Technique: A Proactive Approach to Quantitative Measurement of Collision Risks in Port Waters. *The Journal of Navigation*, 2010, vol. 63, no. 1, pp. 137-152.
10. Debnath A. K., Chin A. C., Hague M. Modelling Port Water Collision Risk Using Traffic Conflicts. *The Journal of Navigation*, 2011, vol. 64, no. 4, pp. 645-655.
11. Griniak V. M. *Razrabotka matematicheskikh modelei obespecheniya bezopasnosti kollektivnogo dvizheniya morskikh sudov: avtoreferat dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Development of mathematical models for ensuring the safety of collective movement of marine vessels: abstract of the dissertation of the Doctor of Technical Sciences]. Vladivostok, 2016. 34 p.
12. Burakovskii E. P., Burakovskii P. E., Dmitrovskii V. A. Matematicheskaiia model' otsenki riska stolknoveniiia v potoke sudov s proizvol'nym napravleniem dvizheniiia [A mathematical model for assessing the risk of collision in a stream of vessels with an arbitrary direction of movement]. *Morskie intellektual'nye sistemy*, 2018, no. 4-3 (42), pp. 11-18.
13. Lentarev A. A. *Osnovy teorii upravleniiia dvizheniem sudov* [Fundamentals of ship traffic management theory]. Vladivostok, Izd-vo MGU imeni admirala G. I. Nevel'skogo, 2018. 194 p.
14. Debnath A. K., Chin A. C., Hague M. Modelling Port Water Collision Risk Using Traffic Conflicts. *The Journal of Navigation*, 2011, vol. 64, no. 4, pp. 645-655.
15. Lentarev A. A. *Otsenka riskov v sudovo-zhdenii* [Risk assessment in navigation]. Vladivostok, Izd-vo MGU imeni admirala G. I. Nevel'skogo, 2022. 143 p.
16. International Maritime Organization (IMO). *Guidance on Near-Miss Reporting*. MSC-MEPC 7/Circ. 7, October. 2008. 6 p.
17. Ofitsial'nyi sait Mezhdunarodnoi assotsiatsii morskikh sredstv navigatsii i maiachnykh sluzhb [Official website of the International Association of Marine Navigation and Lighthouse Services]. Available at: https://www.iala-aism.org/wiki/iwrap/index.php?title=Main_Page (accessed: 16.03.2025).
18. Venttsel' E. S., Ovcharov L. A. *Teoriia veroiatnostei i ee inzhenernye prilozheniya* [Probability theory and its engineering applications]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 480 p.
19. Venttsel' E. S. *Teoriia veroiatnostei: uchebnik* [Probability Theory: a textbook]. Moscow, Knorus Publ., 2010. 664 p.
20. Sharlai G. N. *MPPSS-72 s kommentariiami* [IPPC-72 with comments]. Vladivostok, Izd-vo MGU imeni admirala G. I. Nevel'skogo, 2017. 134 p.
21. Quon T. K. S., Bushell G. E. Modelling navigational risk and oil spill probabilities. *The Journal of Navigation*, 1994, no. 3 (47), pp. 390-403.

Статья поступила в редакцию 17.04.2025; одобрена после рецензирования 14.05.2025; принятa к публикации 22.05.2025
The article was submitted 17.04.2025; approved after reviewing 14.05.2025; accepted for publication 22.05.2025

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Валерьевич Алексеев – аспирант кафедры судовождения; Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского; alexeevdmmitriy97@mail.ru

Dmitrij V. Alekseev – Postgraduate Student of the Department of Navigation; Maritime State University named after admiral G. I. Nevel'skoy; alexeevdmmitriy97@mail.ru

Александр Андреевич Лентарев – доктор технических наук, доцент; профессор кафедры судовождения; Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского; lentarev@msun.ru

Alexandr A. Lentarev – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Navigation; Maritime State University named after admiral G. I. Nevel'skoy; lentarev@msun.ru

