

УДК 656.61.052.484

DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.58-66

IMPACT OF THE CROSS-TRACK ERROR DISTRIBUTION LAW ON SAFE NAVIGATION IN NARROW WATERS

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОПАСНОГО ПРОХОЖДЕНИЯ СУДНОМ СТЕСНЕННОГО РАЙОНА ОТ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ СМЕЩЕНИЯ

I.I. Vorokhobin, PhD, associate professor

И.И. Ворохобин, к.т.н., доцент

National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

The paper indicates that navigation in narrow waters requires navigators to use means of passage safety assessment prior to choosing a route. It is pointed out that a relevant factor when assessing the safe passage probability is the cross-track error distribution law, whose impact is the subject of the research.

The article analyses recent developments and publications that have begun investigating this subject, and highlights previously unsolved parts of the general problem. The results revealed two equivalent approaches, as well as a navigational safety parameter, which are used to determine the probability of safe navigation in narrow waters on the chosen route.

The need to develop advanced predictive vessel motion models is noted, while many researchers study the design of an information system for vessel motion simulation with complex dynamic models and an intelligence system for vessel motion prediction that imitates the learning process of an autonomous control unit created with the use of the artificial neural network. Methods for identification of vessel manoeuvring models are shown. Based on the analysis of vessel hydrodynamics, a nonlinear model frame of vessel manoeuvring is established.

The available publications suggest using compound laws of the first and second types for describing random errors in navigation measurements as an alternative to the normal distribution law.

The article examines the dependence of the safe narrow waters passage probability on the cross-track error distribution law. The normal law and compound laws of the first and second types are considered as the cross-track error distribution laws. A formula for estimating the safe passage probability in the manoeuvring area is given, and expressions for the distribution function of the normal law and compound laws of both types are obtained. To assess the impact of the cross-track error distribution law for the same route, the safe passage probability for the normal distribution law, as well as compound laws of the first and second types, was calculated.

For the same route, the probability of safe passage was calculated with the use of one-dimensional and two-dimensional density models. It is shown that the average relative difference between the estimated safe passage probability for both models is 0.3%, which confirms the validity of using a one-dimensional cross-track error distribution density.

Keywords: safety of navigation, laws of distribution of random errors, safe passage probability, navigation in narrow waters.

РЕФЕРАТ

У роботі наголошується, що при плаванні в обмежених умовах прийняття рішення судноводіям важливо мати у своєму розпорядженні засоби оцінки ймовірності безпечного проходження обмеженим маршрутом. Вказується, що при оцінці такої ймовірності істотним чинником є закон розподілу позиційної похибки проведення судна відносно програмної траєкторії руху, вплив якого є предметом дослідження статті.

У статті проведено аналіз останніх досягнень і публікацій, у яких розпочато рішення даної проблеми, та були виділені невирішені раніше частини загальної проблеми. У результаті аналізу встановлено, що для визначення ймовірності безаварійного плавання судна заданим обмеженим маршрутом запропоновано два еквівалентні підходи, а також критерій навігаційної безпеки.

Відзначена необхідність розробки вдосконалених прогнозних моделей руху судна, а у багатьох роботах розглянуто синтез інформаційної системи імітаційного моделювання руху суден зі складними динамічними моделями і інтелектуальної системи прогнозування руху судна, яка імітує процес навчання автономного блоку управління, створеного за допомогою штучної нейронної мережі. Розглянуті способи ідентифікації судових моделей маневрування. Нелінійна модель маневрування судна базується на основі аналізу гідродинаміки судна.

В існуючій літературі для опису випадкових похибок навігаційних вимірювань на альтернативу нормальному закону розподілу запропоновано змішані закони першого і другого типів.

У статті досліджена залежність ймовірності безпечного проходження обмеженим маршрутом від закону розподілу похибки бічного відхилення судна відносно програмної траєкторії. У якості законів розподілу похибки бічного відхилення розглянуті нормальний закон і змішані закони першого і другого типів. Наведена формула для оцінки ймовірності безаварійного проведення судна у допустимій області, а також одержані вирази для функції розподілу нормального закону і змішаних законів обох типів. Для оцінки впливу закону розподілу ймовірності похибки бічного відхилення для одного і того ж маршруту розраховувалися ймовірності безаварійного проведення судна для нормального закону, а також змішаних законів першого і другого типів.

Для одного і того ж маршруту плавання проводився розрахунок ймовірності безпечного проведення судна заданим маршрутом з використанням моделей одновимірної і двовимірної щільності. Показано, що середня відносна різниця між оцінками ймовірності проведення судна за обома моделями складає 0,3%, що підтверджує правомірність оцінки ймовірності проведення судна обмеженим маршрутом за моделлю із використанням одновимірної щільності розподілу похибки бічного відхилення.

Ключові слова: навігаційна безпека, закони розподілу випадкових похибок, ймовірності безпечного проведення судна, плавання в обмежених умовах.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

При плавании в стесненных водах судоводителям необходимо располагать средствами оценки вероятности безопасного прохождения судном стесненного маршрута для принятия решения следования им. При оценке такой вероятности существенным фактором является закон распределения позиционной погрешности проводки судна относительно

программной траектории движения, влияние которого на величину вероятности является предметом исследования данной статьи.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Влияние позиционной погрешности судна на навигационную безопасность впервые рассматривалось в работе [1], в которой учитывалась только позиционная векториальная погрешность определения места судна, а в качестве навигационной опасности рассматривалось точечное препятствие. Дальнейшее развитие этой тематики отражено в работах [2, 3], причем в работе [2] показаны два эквивалентных подхода к определению вероятности безаварийного плавания судна по заданному стесненному маршруту, а критерий навигационной безопасности предложен в работе [3].

На необходимость применения усовершенствованных компьютерных систем указывается в работе [4], в которой отмечается, что средства прогноза движения судов, успешно применявшиеся в течение длительного времени, отличаются упрощенными моделями. Указанное обстоятельство ограничивает их использование в части текущего отображения движения судна при изменении положения руля и оборотов двигателя, а также требует разработки усовершенствованных прогнозных моделей движения судна.

В работе [5] рассмотрена разработка информационной системы имитационного моделирования движения судов со сложными динамическими моделями. По мнению авторов, данная система позволит обеспечить новый тип планирования маневров судна, а также осуществлять контроль выполнения заданного маневра. Предусмотрено текущее отображение заданного маневра одновременно с фактическим движением судна и с индикацией прогнозируемой траектории.

В работе [6] рассмотрена интеллектуальная система прогнозирования движения судна, которая имитирует процесс обучения автономного блока управления, созданного с помощью искусственной нейронной сети. Входные сигналы наблюдаются блоком управления, который вычисляет значения требуемых параметров маневрирования судна в стесненных водах. Основной задачей системы является непрерывный контроль навигационных параметров судна, и прогноз их значений после определенного интервала времени.

Вопросам идентификации судовых моделей маневрирования посвящена работа [7], в которой сформирована нелинейная модель маневрирования судна, основанная на анализе его гидродинамики. Для оценки параметров модели используется теория идентификации систем, причем расчет параметров модели производится по алгоритму, который основанный на расширенной теории фильтра Калмана. Получение входных и выходных данных системы, необходимых для идентификации параметров, производилось с использованием циркуляции и зигзагообразного маневра.

Альтернативно нормальному закону распределения для описания случайных погрешностей навигационных измерений в работе [8] предложены смешанные законы первого и второго типов, а в работе [9] представлены статистические материалы по точности определения места судна с помощью приёмника спутниковой радионавигационной системы, которые показали, что предположение о распределении случайных погрешностей определения широты и долготы по закону Гаусса не является корректным.

В работе [10] для описания случайных погрешностей предложен обобщенный закон Пуассона, причем в работе [11] приведены результаты исследования возможности описания систем зависимых случайных величин с помощью обобщенного распределения Пуассона с базовым нормальным распределением.

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

Целью статьи является анализ зависимости вероятности безопасного прохождения судном стесненного маршрута от закона распределения погрешности его бокового отклонения относительно программной траектории.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

Помимо нормального распределения погрешности бокового отклонения z могут подчиняться смешанным законам первого и второго типа [8]. Плотность распределения погрешностей бокового отклонения при смешанном законе первого типа имеет следующий вид [8]:

$$f_1(x) = \frac{2^n \alpha^{n+\frac{1}{2}} n!}{\sqrt{2\pi} \cdot 1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n-1)} \frac{1}{(x^2/2 + \alpha)^{n+1}}, \quad (n \leq 6)$$

с дисперсией $\mu_2 = \frac{2\alpha}{2n-1}$.

Если же погрешности бокового отклонения распределены по смешанному закону второго типа, то плотность их распределения $f_2(x)$ и второй центральный момент (дисперсия) μ_2 имеют вид [8]:

$$f_2(x) = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot (2n+1) \alpha^{n+1}}{\sqrt{2} 2^{n+1} n!} \frac{1}{(x^2/2 + \alpha)^{n+3/2}}, \quad (n \leq 5)$$

причем дисперсия $\mu_2 = \frac{\alpha}{n}$.

Оценка вероятности безаварийной проводки судна P в допустимой области производится с помощью формулы [2]:

$$P = \exp \left\{ s \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \varphi(b) \ln \left\{ \int_{\delta_{b\min}}^{\delta_{b\max}} \gamma(\delta_b, b) \left[F\left(\frac{b}{2} - \delta_b\right) + F\left(\frac{b}{2} + \delta_b\right) \right] d\delta_b \right\} db \right\}, \quad (1)$$

в котором приняты следующие обозначения:

s - длина программной траектории;

b_{\min} и b_{\max} - соответственно минимальное и максимальное значения ширины b допустимой области ;

$\varphi(b)$ - распределением частот по значениям ширины b допустимой области;

$\delta_{b\max}$ и $\delta_{b\min}$ - соответственно максимальное и минимальное значения смещения δ_b программной траектории движения судна;

$\gamma(\delta_b, b)$ - безусловное распределение частот появления смещения δ_b в зависимости от значения ширины b допустимой области;

F - функция распределения вероятностей погрешности бокового отклонения.

В формуле (1) необходимо рассчитывать значение выражения $F(\frac{b}{2} - \delta_b) + F(\frac{b}{2} + \delta_b)$, для чего следует располагать возможностью вычислять функции распределения нормального закона и смешанных законов обоих типов. Для нормального закона функция распределения не выражается в элементарных функциях. В работе [12] показано, что значение функции распределения нормального закона может быть получено с помощью функции Лапласа:

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt,$$

которая представлена в табличном виде. Функция распределения смешанного распределения первого типа $F_{1n}(x)$ может быть получена с помощью выражения для плотности распределения $f_1(x)$:

$$F_{1n}(x) = \int_{-\infty}^x f_1(t) dt = \frac{2^n \alpha^{n+\frac{1}{2}} n!}{\sqrt{2\pi} 1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n-1)} \int_{-\infty}^x \frac{dt}{(x^2/2 + \alpha)^{n+1}} \quad (n \leq 6)$$

В работе [11] получено выражение функции распределения смешанного закона первого типа, которое имеет вид:

$$F_{1n}(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \frac{x}{\sqrt{2\alpha}} + \sum_{i=1}^n \frac{2^{n-i} \alpha^{(n-i)+\frac{1}{2}} (n-i)!}{\sqrt{2\pi} 1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot [2n - (2i-1)]} \frac{x}{(\frac{x^2}{2} + \alpha)^{n+1-i}} \quad (n \leq 6)$$

Аналогично для смешанного закона второго типа:

$$F_{2n}(x) = \int_{-\infty}^x f_2(t) dt = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot (2n+1) \alpha^{n+1}}{\sqrt{2} 2^{n+1} n!} \int_{-\infty}^x \frac{dt}{(x^2/2 + \alpha)^{n+3/2}} \quad (n \leq 5)$$

Выражение функции распределения для смешанного закона распределения второго вида в явном виде приведено в работе [11] и имеет следующий вид:

$$F_{2n}(x) = 1 - 2^n 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot (2n+1) \left\{ \sum_{j=0}^n \frac{(-1)^j \alpha^{n+1+j}}{j!(n-j)!(n+1+j) (x^2 + 2\alpha + x\sqrt{x^2 + 2\alpha})^{n+1+j}} \right\} \quad (n \leq 5)$$

Пользоваться для расчета приведенными выражениями функции распределения неудобно из-за их громоздкости. Поэтому в работе расчет функций распределения производился численным интегрированием плотности распределения методом Симпсона.

По разработанному алгоритму расчета вероятности безопасного прохождения стесненного участка была написана компьютерная программа, в которой помимо точного

расчета вероятности безаварийной проводки судна P по формуле (1) производился расчет вероятности P по приближенной формуле, учитывающей средние значения нормальной ширины b_m и смещения δ_{bm} , причем приближенную оценку обозначена $P_{пр}$:

$$P_{пр} = \left[\int_{-b_m/2}^{b_m/2} f(x - \delta_{bm}) dx \right]^s = \left[2 \int_0^{b_m/2} f(x - \delta_{bm}) dx \right]^s.$$

Для оценки влияния закона распределения вероятностей погрешности бокового отклонения для одного и того же маршрута рассчитывались вероятности P и $P_{пр}$ для нормального закона, а также смешанных законов первого и второго типов. Был проведен анализ безопасности плавания маршрутом, распределение нормальной ширины которого показано на рис. 1.

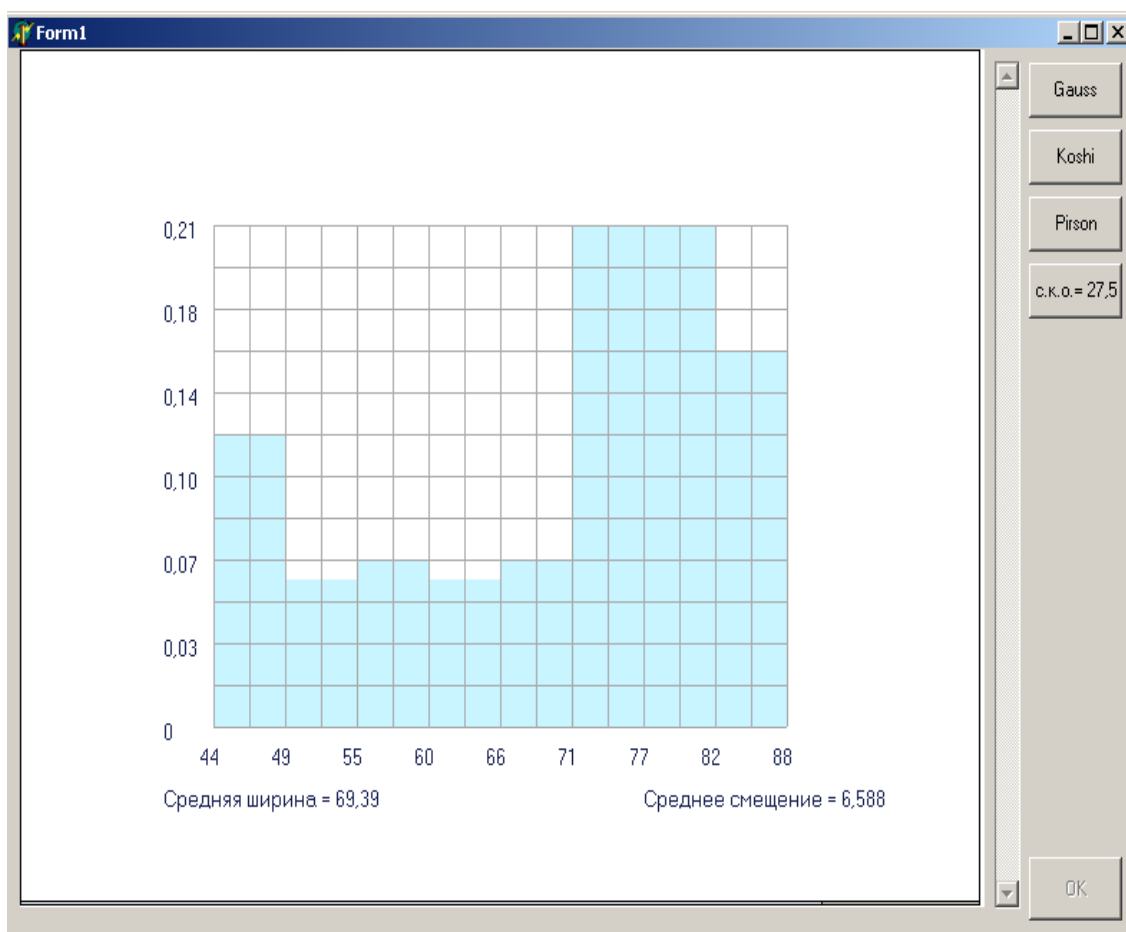


Рис. 1. Распределение нормальной ширины маршрута

Для различных законов распределения погрешности бокового отклонения с помощью компьютерной программы получены значения точной и приближенной вероятности безопасного прохождения маршрута.

В программу предусмотрено ввод массивов точек, которые характеризуют правую и левую границы безопасной области плавания, а также программную траекторию движения судна. Для расчета значений точной и приближенной вероятности безопасного прохождения маршрута следует выбрать закон распределения погрешности бокового отклонения и ввести значение ее дисперсии. Если выбран смешанный закон распределения, то надлежит выбрать его существенный параметр.

Для исследования влияния закона распределения погрешностей бокового отклонения и точности их определения на вероятность безопасной проводки судна маршрутом были произведены расчеты вероятности P смешанных законов обоих типов с различными существенными параметрами n и значениями σ от 20 до 50. Результаты расчета вероятности P для маршрута рассмотренного примера представлены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что при значениях $\sigma \geq 20$ при плавании маршрутом независимо от закона распределения погрешности бокового отклонения вероятность $P \geq 0,999$ вообще не достигается. Анализ табл. 1 показывает, что вероятность P уменьшается с ростом σ , а при неизменном значении σ увеличивается с ростом значения существенного параметра распределений n_1 (n_2).

Таблица 1. Зависимость вероятности P для маршрута

Закон	$\sigma=20$	$\sigma=30$	$\sigma=40$	$\sigma=50$
1-й тип $n_1=1$	0,7962	0,6682	0,5491	0,4446
2-й тип $n_2=1$	0,8429	0,7100	0,5772	0,4570
1-й тип $n_1=2$	0,8761	0,7477	0,6115	0,4843
2-й тип $n_2=2$	0,8966	0,7732	0,6367	0,5069
1-й тип $n_1=3$	0,9098	0,7906	0,6545	0,5221
2-й тип $n_2=3$	0,9189	0,8030	0,6675	0,5349
1-й тип $n_1=4$	0,9255	0,8121	0,6772	0,5430
2-й тип $n_2=4$	0,9305	0,8191	0,6847	0,5500
1-й тип $n_1=5$	0,9344	0,8247	0,6906	0,5555
2-й тип $n_2=5$	0,9375	0,8292	0,6954	0,5601
1-й тип $n_1=6$	0,9400	0,8329	0,6994	0,5638

Произведем сравнительную характеристику двумерной и одномерной моделей оценки вероятности безопасной проводки судна заданным маршрутом с помощью имитационного моделирования. Для одного и того же маршрута плавания, включающего границы безопасной области плавания и программную траекторию движения судна, производился расчет вероятности безопасной проводки судна заданным маршрутом по обоим моделям и полученные результаты сравнивались. Вероятность, полученную по модели одномерной плотности, обозначим через P_1 , а по модели двумерной плотности – через P_2 .

С помощью компьютерной программы формировались пять вариантов стесненного маршрута плавания судна, для чего вводились массивы границ области безопасного плавания и программная траектория плавания судна, выбиралось значение с.к.о. и принималось, что погрешности подчиняются нормальному закону распределения. Затем производился расчет оценки вероятности P_2 безопасной проводки судна стесненным маршрутом. Далее с помощью компьютерной программы были определены одномерные характеристики каждого из маршрутов, которые позволили произвести точную оценку вероятности безопасного плавания P_1 по одномерной модели.

Результаты имитационного моделирования оценки вероятности безопасной проводки судна по всем пяти маршрутам с помощью обеих моделей представлены в табл. 2.

Таблиця 2. Результати оцінки вероятності безпечної проводки судна

Маршрут	1	2	3	4	5
P_1	0,487	0,543	0,9818	0,9179	0,8149
P_2	0,484	0,546	0,982	0,916	0,817
δP (%)	0,6	0,5	0,02	0,2	0,3

Средняя относительная разница между оценками вероятности проводки судна по обоим моделям, как следует из табл. 2, составляет 0,3 %, что подтверждает правомерность оценки вероятности проводки судна по стесненному маршруту моделью с применением одномерной плотности распределения погрешности бокового отклонения.

С учетом полученного результата для оценки вероятности безопасной проводки судна стесненным маршрутом при предварительной проработке рейса целесообразно воспользоваться одномерной моделью. Учитывая, что погрешность бокового отклонения может подчиняться одному из трех законов распределения (нормальному или смешанным законам), следует рассчитать максимальную вероятность безопасной проводки для каждого из законов распределения погрешности бокового отклонения, для чего выбирается наиболее безопасная программная траектория движения судна и максимально доступная точность проводки. Затем из трех полученных значений необходимо выбрать минимальное значение вероятности безопасной проводки, по которому принимать решение о возможности безопасной проводки судна по анализируемому стесненному маршруту.

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

Таким образом, в работе исследована зависимость вероятности безопасного прохождения судном стесненного маршрута от закона распределения погрешности бокового отклонения. В дальнейшем целесообразно рассмотреть влияние траекторных погрешностей на безопасность проводки судна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондрашихин В.Т. Определение места судна / Кондрашихин В.Т. - М.: Транспорт, 1989. – 230 с.
2. Ворохобин И.И. Эквивалентность оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненном районе / Ворохобин И.И., Северин В.В., Казак Ю.В. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА. Вип. 25. – Одеса: «ВидавІнформ», 2015 – С. 40 – 47.
3. Мельник Е.Ф. Обоснование выбора критерия навигационной безопасности судовождения/ Мельник Е.Ф.// Судовождение. – 2002. - № 5. – С. 65 - 73.
4. K. Benedict. Manoeuvring Simulation on the Bridge for Predicting Motion of Real Ships and as Training Tool in Ship Handling Simulators/ K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Baldauf // TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 3, № 1, page 25-30, 2009.
5. K. Benedict. Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling/ K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Schaub, M. Baldauf, S. Klaes// TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 8, № 1, page 131-141, 2014.
6. M. Ljacki. Intelligent Prediction of Ship Maneuvering / M. Ljacki // International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 10, № 3, page 511-516, 2016.
7. C.J. Shi. Identification of Ship Maneuvering Model Using Extended Kalman Filters/ C.J. Shi, D. Zhao, J. Peng, C. Shen// TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 3, № 1, page 105-110, 2009.

8. Астайкин Д.В. Идентификация законов распределения навигационных погрешностей смешанными законами двух типов / Астайкин Д.В., Алексейчук Б.М. // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2014. – Вып. 20. Одесса: ОНМА. – С. 3 – 9.
9. Monteiro Luis. What is the accuracy of DGPS? / Sardinia. Monteiro Luis, Moore Terry, Hill Chris. // J. Navig. 2005. 58, № 2, p. 207-225.
10. Сикирин В.Е. Описание навигационных погрешностей с помощью обобщенного распределения Пуассона/ Сикирин В.Е.// Судовождение: Сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 26. – Одесса: «ИздатИнформ», 2016 - С. 152 – 156.
11. Астайкин Д.В. Оценка точности координат судна при избыточных измерениях / Астайкин Д.В., Сикирин В.Е., Ворохобин И.И., Алексейчук Б.М. – Saarbrücken, Deutschland / Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 274 с.
12. Вентцель Е.С. Теория вероятностей/ Е.С. Вентцель – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. - 564 с.