

ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ НАВІГАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА БЕЗПЕКА КОРАБЛЕВОДІННЯ

Корошенко М. М.

начальник кафедри кораблеводіння та штурманського озброєння
Інституту Військово-Морських Сил
Національного університету «Одеська морська академія»
ORCID ID: 0000-0002-3445-2297

Корніюк В. Я.

викладач кафедри кораблеводіння та штурманського озброєння
Інституту Військово-Морських Сил
Національного університету «Одеська морська академія»
ORCID ID: 0000-0003-4373-5237

Анотація. Незважаючи на обладнання суден світового флоту сучасними системами навігації, кількість навігаційних аварій і аварійних випадків усе ще залишається досить великою. Однією з головних причин цього є «людський чинник» – неврахування або неправильне врахування похибок різного характеру під час визначення навігаційних величин. Теорія похибок дає розуміння природи та законів виникнення похибок. Для оцінювання точності визначення місця корабля введені поняття середнього квадратичного еліпса похибок (СКЕП) і радіальної середньої квадратичної похибки (РСКП). Аналіз найбільш поширених способів обсервації дозволяє штурману вибрати для визначення місця корабля найбільш зручні й ефективні в даних умовах плавання.

Ключові слова: навігаційна аварія, точність, похибка, лінія положення, СКЕП, РСКП, пеленг, відстань, РЛС, GPS.

Koroshchenko M. M., Korniyuk V. Ya. ACCURACY IN DETERMINING OF NAVIGATION PARAMETERS AND SAFETY OF NAVIGATION

Abstract. Despite the equipping of the world fleet with modern navigation systems, the quantity of navigation accidents remains rather large. One of the main reasons for this is the “human factor” – ignore or incorrect counting different errors while determining navigation parameters. The theory of errors provides an understanding of the nature and regularities in occurrence of errors. To evaluate the accuracy of determining ship’s location the concepts of mean square error ellipse and radial mean square error were introduced. Analysis of the most used methods of fix allows the navigator to choose the most convenient and effective in the current sailing conditions to determine ship’s location.

Key words: navigation accident, fix, accuracy, error, position line, mean square error ellipse, radial mean square error, bearing, distance, radar, GPS.

Вступ

Постановка проблеми. Світовий флот щорічно поповнюється новими суднами, спроектованими та збудованими за новітніми технологіями. Велика кількість суден, що були збудовані двадцять і більше років тому, на вимогу міжнародних конвенцій обладнані сучасними приладами та системами. Це дозволило значно знизити аварійність світового морського флоту, але не позбутися її цілком. Питання точності визначення положення та параметрів руху судна досі залишаються одними з головних у гарантуванні безпеки мореплавства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз аварій суден світового морського

флоту за останні роки [1; 2] свідчить про те, що переважають суто навігаційні види аварійності – посадка на міліну та зіткнення. До того ж більшість аварійних випадків, на жаль, пов’язані з людським чинником [2; 3].

Вид аварійності, % аварійності

1. Зіткнення суден – 32 %.
2. Втрата керованості – 30 %.
3. Відмова обладнання – 14 %.
4. Посадка на міліну – 13 %.
5. Пожежа – 6 %.
6. Інші – 5 %.

Посадка на міліну або зіткнення з перешкодою, що безпосередньо не спостерігається, але

позначена на навігаційній карті, частіше за все є або результатом неправильного вирішення навігаційних завдань (без урахування можливих похибок у визначених місці й елементах руху судна), або ж результатом неправильного оцінювання похибок навігаційних величин. Із цього випливає, що аварійні випадки, пов'язані із зіткненнями з невидимими перешкодами, зумовлені головним чином штурманськими прорахунками – неправильною оцінкою площі вірогідного місцезнаходження судна або не зіставленням цієї площі з відстанню до навігаційної небезпеки.

Мета статті. Метою статті є ознайомлення з основами теорії похибок, що необхідно для розуміння закономірностей їх виникнення, а також порівняльний аналіз точності найбільш поширених штурманських способів контролю положення корабля щодо небезпек, контролю та корекції обчислення з погляду їх використання в зазначених умовах плавання.

Виклад основного матеріалу

Під час плавання основна робота штурмана полягає в безперервному контролі положення корабля щодо небезпек і коригуванні елементів його руху з метою гарантування безпеки переходу. Для цього ведеться безперервний розрахунок і регулярно виконується визначення місця корабля (обсервації).

Будь-яке місце корабля – розрахункове або обсервоване – визначається з тими чи іншими похибками, що зумовлені неточністю вихідних навігаційних величин (елементів розрахунків або навігаційних параметрів), за якими воно визначалось. Тому точка на карті, що приймається за місце корабля, відображає лише його найбільш вірогідне положення на земній поверхні. Справжнє місце корабля може опинитися зміщеним щодо цієї точки на величину, пропорційну похибкам вихідних навігаційних величин.

У практиці кораблеводіння розглядають такі види похибок: випадкові, систематичні та грубі (промахи). *Випадкові похибки* – це похибки, величина та знак яких випадково змінюються від виміру до виміру того самого навігаційного параметра в даному комплексі вимірювань (наприклад, «розкид» пеленгів у пеленгуванні орієнтира). *Систематичні похибки* – це похибки, що зберігають свій знак

і величину під час кожного вимірювання навігаційного параметра або закономірно змінюються за визначеним законом зі зміною умов вимірювань (наприклад, неправильно визначена поправка компаса), що однаково буде впливати на значення кожного виміру. *Грубі похибки (промахи)* – це випадкові похибки, значення яких перевищують за величиною припустимі межі точності для даного виду спостережень. Такі похибки виникають із-за значних порушень правил вимірювання й обробки, неуважності спостерігача тощо та до уваги не беруться.

Вплив систематичних і грубих похибок можна зменшити або вилучити з результатів вимірювань навігаційного параметра. Випадкові похибки цілком виявити та врахувати неможливо, і саме вони переважають у всіх вимірах. Випадкові похибки можна врахувати тільки в середньому, а для цього треба знати та врахувати закономірності, яким підкоряються ці похибки.

Випадкові похибки, що трапляються у штурманській практиці, зазвичай підкоряються нормальному закону розподілу, що сформулював Карл Фрідріх Гаус:

$$f(\Delta) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 \Delta^2}, \quad (1)$$

де h – міра точності,
 e – основа натуральних логарифмів,
 Δ – похибки вимірювання.

Графічно закон К.Ф. Гауса представлений кривою, що симетрична стосовно осі ординат $f(\Delta)$ (рис. 1) і зветься наметом Ейлера.

У результаті проведеного аналізу цієї кривої можна дійти таких висновків:

1) унаслідок симетричності кривої щодо осі ординат позитивні та негативні похибки рівновірогідні;

2) унаслідок тієї ж симетричності однакові за абсолютною величиною, але різні за знаком похибки рівновірогідні;

3) малі за абсолютною величиною похибки більш вірогідні, ніж великі;

4) зі зростанням абсолютних величин випадкових похибок їхня вірогідність наближається до нуля (але ніколи його не досягає);

5) теоретично не виключається можливість отримання нескінченно великих похибок.

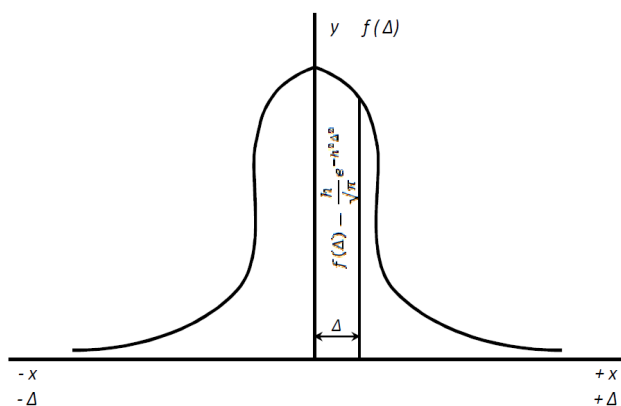


Рис. 1. Графічне представлення нормального закону розподілу (закон К.Ф. Гауса)

Величина h у рівнянні К.Ф. Гауса має назву *міра точності*. Чим більше h , тим менше величина похибок, тим точніше метод вимірювань.

У разі врахування всіх поправок вихідних навігаційних величин похибка місця корабля має випадковий характер, тобто воно може опинитися зміщеним у будь-якому напрямку та на невизначену величину. Спрогнозувати точне значення випадкової похибки неможливо. Тому з вірогідністю припускається, що випадкові похибки розташовуються в межах деякої області, що зветься областю вірогідного місцезнаходження корабля. Чим точніше спосіб (засіб) обсервації, тим менше площа цієї області.

Кожному обсервованому навігаційному параметру U відповідає своя лінія положення (навігаційна ізолінія), за сукупністю яких визначається обсервоване місце корабля.

Якщо в обсервованому навігаційному параметрі є випадкова похибка, що характеризується середнім квадратичним значенням m_U , лінія положення зміститься паралельно собі на величину $m_{\text{ш}}$, що зветься середньою квадратичною похибкою (далі – СКП) лінії положення. Її чисельне значення вираховується за формулою:

$$m_{\text{ш}} = \frac{m_U}{g}, \quad (2)$$

де g – градієнт навігаційного параметра – вектор, перпендикулярний лінії положення

та спрямований у бік збільшення чисельного значення навігаційного параметра.

Випадкові похибки ліній положення є причиною випадкового зміщення обсервованої точки, яке змінюється за кожного чергового визначення місця. Тому передбачити конкретну векторну похибку обсервації неможливо. Можна лише дати ймовірнісну оцінку точності місця – визначити площу, у межах якої розташовується реальне місце корабля з тією чи тією вірогідністю. Водночас можна використовувати площі, обмежені різними лініями.

За нормального розподілу випадкових похибок навігаційних параметрів випадкові похибки обсервації розташовані в межах еліпса. Щодо обсервованої точки можна провести незліченну кількість подібних еліпсів, кожний із яких відповідає визначеній вірогідності знаходження реального місця в його межах.

Показником точності місця є один із цих еліпсів – середній квадратичний еліпс похибок (далі – СКЕП) (рис. 2). Він характеризується трьома елементами: великою головною напіввіссю a , малою головною напіввіссю b і кутом α , під яким велика вісь перетинається з меридіаном (іноді замість кута α використовується кут φ – кут перетинання однієї з ліній положення (далі – ЛП) з великою головною віссю).

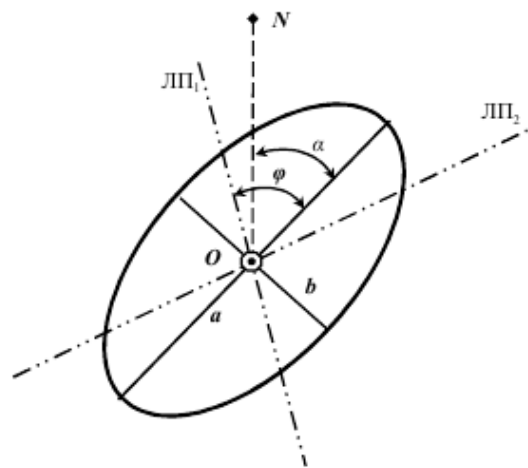


Рис. 2. Середній квадратичний еліпс похибок

Вірогідність P знаходження реального місця корабля в еліпсі із заданими напівосями $A = c \cdot a$ та $B = c \cdot b$ (c – коефіцієнт збільшення головних півосей середнього квадратичного еліпса) вираховується за формулою:

$$P = 1 - e^{-\frac{c^2}{2}}. \quad (3)$$

За цією формулою можна отримати вірогідності невиходу справжнього місця корабля за межі СКЕП, подвоєного та потроєного СКЕП. Ці вірогідності відповідно дорівнюють: $P_{СКЕ} = 0,393$; $P_{2СКЕ} = 0,865$; $P_{3СКЕ} = 0,989$.

Середній квадратичний еліпс похибок існує тільки за дотримання двох умов – нормального розподілення похибок вимірювання та лінійної залежності між цими похибками та похибками місця. Остання умова відповідає сталості градієнтів навігаційних параметрів в області дії похибок. Якщо ці умови дотримуються, вірогідність знаходження місця корабля в межах СКЕП не буде залежати від співвідношення його півосей. В іншому разі СКЕП не буде відповідати ізолінії щільності розподілу похибки місця, а вказана вірогідність не буде дорівнювати розрахунковому значенню.

На практиці для оцінки точності місця корабля використовується більш проста в порівнянні з еліпсом величина – радіальна середня квадратична похибка (далі – РСКП) M . Ця умовна характеристика точності місця являє собою коло, описане щодо оцінюваного місця радіусом M , що дорівнює геометричній сумі головних (a і b) півосей середнього квадратичного еліпса (рис. 3), тобто:

$$M = \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (4)$$

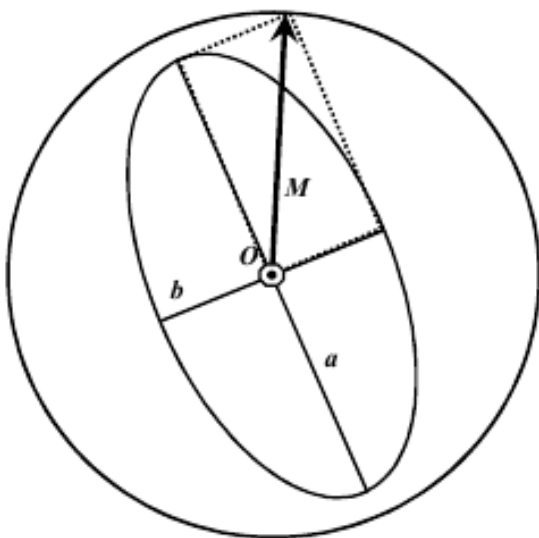


Рис. 3. Радіальна середня квадратична похибка

Розрахунок вірогідності невиходу справжнього місця корабля за межі кола з радіусом R проводиться за формулою кругового закону розподілення Релея:

$$P = 1 - e^{-\left(\frac{R}{M}\right)^2}. \quad (5)$$

Вірогідності невиходу справжнього місця корабля за межі кола з радіусами M , $2M$ та $3M$ відповідно дорівнюють: $P_M = 0,632$; $P_{2M} = 0,982$; $P_{3M} = 0,999$.

Знання поточного місця корабля забезпечується безперервним веденням під час переходу навігаційної прокладки, яка передбачає безперервний розрахунок координат корабля з періодичними визначеннями місця та розрахунками необхідних маневрів.

Ця відповідальна робота покладена на штурманів, які несуть повну відповідальність за навігаційну безпеку під час переходу.

Процес вимірювання й обробки навігаційних параметрів для визначення розрахункового місця корабля та його координат під час проведення обсервацій супроводжується похибками внаслідок недосконалості приладів, органів чуття людини, недоліків методів вимірювання та розрахунку, впливу на процес вимірювання сторонніх чинників, які важко або зовсім неможливо врахувати. Тому для гарантування навігаційної безпеки плавання необхідно мати уявлення про точність використовуваних способів визначення місця корабля (точності обсервованих координат).

Незважаючи на швидкий розвиток радіоелектронних засобів і методів кораблеводіння (супутникові навігаційні системи), частина визначень місця корабля за деяких умов плавання виконується візуальними способами (за допомогою пеленгатора, секстана тощо). Це потребує уважного, ретельного підходу до визначення точності отриманого місця.

Радіальна СКП визначення місця за компасними пеленгами двох орієнтирів оцінюється за відомою формулою:

$$M = \frac{1}{\sin \theta} \sqrt{m_{\text{м}1}^2 + m_{\text{м}2}^2 + 2rm_{\text{м}1}m_{\text{м}2} \cos \theta}, \quad (6)$$

де θ – кут перетинання пеленгів;

r – коефіцієнт кореляції;

$m_{\text{м}1}$ і $m_{\text{м}2}$ – СКП ліній положення.

Під час вимірювання пеленгів:

$$m_{\text{п}} = \frac{m_n D}{57,3^\circ}, \quad (7)$$

де $m_{\text{п}}$ – СКП істинного пеленга;
 D – відстань до орієнтира.

За незалежних навігаційних параметрів, коли $r = 0$, або якщо лінії положення взаємно перпендикулярні ($\theta = 90^\circ$):

$$M = \frac{m_n}{57,3^\circ \sin \theta} \sqrt{D_1^2 + D_2^2}. \quad (8)$$

Пеленг, отриманий за допомогою магнітного компаса:

- похибка наведення та відліку $\varepsilon_1 = \pm 0,3^\circ \div 0,5^\circ$;
 - похибка у схиленні $\varepsilon_2 = \pm 0,25^\circ \div 0,4^\circ$;
 - похибка у девіації $\varepsilon_3 = \pm 0,5^\circ \div 0,7^\circ$.
- Повна похибка $m = \pm 0,7^\circ \div 1,0^\circ$.

Пеленг, отриманий за допомогою гірокомпаса:

- похибка наведення та відліку $\varepsilon_1 = \pm 0,3^\circ$;
- похибка через нахил репітера $\varepsilon_2 = \pm 0,1 - 0,2^\circ$;
- інерційні похибки гірокомпаса $\varepsilon_3 = \pm 0,3 - 1,0^\circ$;

– похибка визначення поправки гірокомпаса $\varepsilon_4 = \pm 0,5 - 0,7^\circ$.

Повна похибка $m = \pm 0,4^\circ \div 0,8^\circ$.

Середнє значення похибки істинного пеленга $m_{\text{п}} = 0,6 \div 1,7^\circ$.

Так, точність обсервації за двома орієнтирами, однаково віддаленими на $D = 3,0$ милі, з кутом перетину їх пеленгів, близьким до прямого ($\theta = 90^\circ$), за незалежних обсервацій ($r = 0$) та СКП істинного пеленга $m_{\text{п}} = 1,5^\circ$: $M = 0,11$ милі = 205,7 м.

Для оцінки точності місця, отриманого за трьома рівноточними пеленгами, рекомендується спрощена формула:

$$M = \frac{m_n D_{\text{cp}}}{57,3^\circ \sin \theta_{\text{cp}}}, \quad (9)$$

де D_{cp} – середнє арифметичне значення відстаней до орієнтирів;

θ_{cp} – середнє арифметичне значення кутів перетину пеленгів.

Точність обсервації за трьома орієнтирами, однаково віддаленими на $D = 3,0$ милі, з кутом перетину їх пеленгів, близьким до $\theta = 120^\circ$, за незалежних обсервацій ($r = 0$) та СКП істинного пеленга $1,5^\circ$: $M = 0,09$ милі = 167 м.

Радіальна СКП визначення місця за двома відстанями, виміряними за допомогою корабельної радіолокаційної станції (РЛС), оцінюється за формулою (6). Водночас $m_{\text{п}} = m_D$, де m_D – СКП вимірювання відстаней за допомогою РЛС.

За надійно відкаліброваної РЛС коефіцієнт кореляції вимірянних радіолокаційних відстаней практично дорівнює нулю. Отже, якщо відстані до орієнтирів приблизно однакові, то розрахункова формула буде мати такий вигляд:

$$M = \frac{1,4m_D}{\sin \theta}. \quad (10)$$

Під час вимірювання відстаней за допомогою рухомого кола дальності РЛС повна похибка відстані складається з похибки суміщення кола дальності з переднім краєм зображення та похибки калібрування РЛС. СКП суміщення характеризує точність процесу вимірювань і становить 0,6–0,1 % від виміряної відстані D , якщо орієнтир точковий, та 0,6–3,0 % D , якщо відстань вимірюється до низинних ділянок берегової лінії. СКП калібрування РЛС спеціалістами не перевищує 0,6 % D .

Отже, для сучасних корабельних РЛС середнє значення повної СКП вимірювання відстаней не перевищує 1 % D . Оцінка точності обсервації за двома орієнтирами, однаково віддаленими на $D = 3,0$ милі, за кута перетину їх ізоліній, близького до прямого ($\theta = 90^\circ$), за незалежних обсервацій ($r = 0$), із СКП виміряної відстані $m_D = 0,01D$, дає: $M = 0,042$ милі = 77,8 м.

Для оцінки точності місця, отриманого за трьома радіолокаційними відстанями, рекомендується спрощена формула:

$$M = \frac{m_D}{\sin \theta_{\text{cp}}}. \quad (11)$$

Оцінка точності місця, отриманого за трьома радіолокаційними відстанями до орієнтирів, однаково віддалених на $D = 3,0$ милі, з кутом перетину їх ізоліній $\theta = 90^\circ$, із СКП виміряної відстані $m_D = 0,01D$, дає результат: $M = 0,0035$ милі = 64,2 м. Отриманий результат можна порівняти з точністю стандартного режиму обсервацій із використанням GPS.

На сучасних кораблях основним і найбільш поширеним способом визначення місця є використання американської супутникової системи GPS Navstar. Для точок земної поверхні в широтах $\varphi = 55^{\circ}\text{N} \dots 55^{\circ}\text{S}$ точність GPS у горизонтальній площині оцінюється радіальною СКП $M_0 = 58 \text{ м}$.

Ці стандартні параметри точності визначені для спостережуваного сузір'я із 4-х супутників за їх піднесення над горизонтом у 5° . Максимальна точність обсервації досягається, коли один із супутників перебуває в зеніті, а останні три супутники розташовані рівномірно за азимутом поблизу горизонту. Основними джерелами похибок у визначенні координат є власні шуми приймальної апаратури, похибки вимірювання часу та розрахунку ефемерід, вплив атмосфери. Залежно від місцезнаходження корабля або часу доби реальна точність GPS може змінюватись.

Використання GPS у диференційному режимі, за якого в обсервовані координати автоматично вводяться поправки, що приймаються з контрольних станцій, дозволяє отримувати горизонтальну точність із СКП $M_0 \approx 3 \div 5 \text{ м}$.

Якщо визначення місця корабля здійснюється за сигналами супутникових радіонавігаційних систем (NAVSTAR/GPS), важливо контролювати моменти автоматичної зміни «сузір'їв» супутників, що використовуються. Зміна «сузір'я» практично не впливає на якість обсервацій, якщо послідовно замінюється один супутник за другим («м'яка» зміна сузір'я). Але може спостерігатися миттєвий (хоча й досить короткочасний) «стрибок» обсервованих координат у разі «жорсткої» зміни, коли приймач-індикатор припиняє роботу з попереднім «сузір'ям» і набирає нове «сузір'я» супутників для визначення місця корабля. Частіший кон-

троль роботи GPS необхідний також у ситуаціях гранично малої кількості супутників у зоні радіовидимості корабля, в умовах сильних перешкод, якщо спостерігається «розкид» показань приймача-індикатора тощо.

У будь-якому разі під час плавання поблизу берегів і навігаційних небезпек необхідно систематично зіставляти обсервації, що отримані за допомогою GPS, з обсерваціями за береговими орієнтирами (візуальні або радіолокаційні), за яких координатна система у явному вигляді взагалі не використовується, а точки наносяться на карту за пеленгами та/або відстанями щодо обраних навігаційних орієнтирів. Систематичні розбіжності між точками, що отримані із GPS і за береговими орієнтирами, вкажуть на наявність, напрям і величину неузгодженості геодезичних основ карти та приймача-індикатора GPS.

Висновки

1. Сучасні радіоелектронні навігаційні системи звільняють штурманів від виконання рутинних операцій із визначення місця корабля (технічних вимірювань, розрахунків, прокладання обсервованих ліній положення тощо), однак у штурмана залишається важливе аналітичне завдання: систематичне оцінювання точності та надійності автоматично одержуваних обсервацій доступними візуальними засобами.

2. Точність визначення навігаційних величин значно знижується в разі неправильного врахування або неврахування систематичних і випадкових похибок.

3. У разі правильного налаштування та використання устаткування, що використовується для візуальних обсервацій, можна отримати точність визначення місця корабля, яку можна порівняти з точністю GPS, що працює у стандартному режимі.

Література:

1. Marine Accident Investigation Branch reports. URL: <https://www.gov.uk/maib-reports>.
2. EMSA. Accident Investigation Publications. URL: <https://www.emsa.europa.eu/accident-investigation-publications/annual-overview.html>.
3. Крейтор М. Аналіз причин аварійності суден. *Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства* : матеріали X Всеукраїнської студентської наукової конференції, м. Херсон, 19 листопада 2020 р. Херсон : Видавництво ХДМА, 2020. С. 176–179.
4. Морська навігація / М. Корощенко та ін. Одеса : ІВМС НУ ОМА, 2017. 110 с.
5. Завгородній М., Кубицький Р. Математична обробка та аналіз навігаційної інформації : курс лекцій. Одеса : ІВМС НУ ОМА, 2021. 100 с.
6. Гусак І. Морська навігація : навчальний посібник. Севастополь : СВМІ ім. П.С. Нахімова, 2003. 108 с.

References:

1. Marine Accident Investigation Branch (n.d.). Marine Accident Investigation Branch reports. Retrieved from: <https://www.gov.uk/maib-reports>.
2. EMSA (2022). Accident Investigation Publications: Retrieved from: <https://www.emsa.europa.eu/accident-investigation-publications/annual-overview.html>.
3. Krejtor, M.P. (2020). Analiz prichin avariynosti suden [Analysis of the causes of ship accidents]. *Materials of the 10th All-Ukrainian Student Scientific Conference “Modern problems of maritime transport and maritime safety”*. Kherson. Pp. 176–179 [in Ukrainian].
4. Koroschenko, M.M., Hapov, A.P., Buga, A.O. (2017). Morska navigatsiia [Marine navigation]. Odesa : IVMS NU OMA. 110 p. [in Ukrainian].
5. Zavgorodnii, D., Kubitskii, R. (2021). Matematychna obrobka ta analiz navigatsiynoi informatsii : kurs leksii [Mathematical processing and analysis of navigational information : Course of lectures]. Odesa : IVMS NU OMA. 100 p. [in Ukrainian].
6. Gusak, I.I. (2003). Morska navigatsiia : navchalnyi posibnyk [Marine navigation : Study guide]. Sevastopol : SVMi im. P.S. Nakhimova. 108 p. [in Ukrainian].