

Іваненко В.М.

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Федунов В.М.

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Урум Н.С.

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Бажак О.В.

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОРЕХІДНОЇ АСТРОНОМІЇ

У статті проаналізовано основні елементи морехідної астрономії та їх взаємодії. Їх основною метою є формування базових принципів отримання астрономічних обсервацій і методів розрахунку поправки суднових навігаційних курсопоказників. Безпосередньо необхідність знання судноводіями астрономічних способів контролю місця розташування судна й роботи курсопоказника відбито в Міжнародній конвенції з дипломування та несення навігаційної вахти та є однією з основних вимог під час базової підготовки судноводія. Абсолютна довіра супутниковим методам судноводіння значно підвищує ризик виникнення аварійної ситуації. У відкритому морі наявність додаткової астрономічної інформації про місце положення судна, отриманої незалежно від роботи супутникових і радіонавігаційних систем, надає роботі судноводія впевненості у своїх діях. Особливо актуальним це стає в разі наближення судна до берега до початку можливості контролю роботи супутникових систем навігації радіолокаційними способами визначення місця судна. Традиційні методи отримання незалежної астрономічної інформації в умовах дефіциту вільного часу в судноводія на вахті часто залишаються незатребуваними через трудоємність виконання астрономічних розрахунків. Наявність сучасних програм обробки астрономічних спостережень дозволяє зняти цю проблему. Однак кожен судноводій повинен знати принципи отримання астрономічних обсервацій і методи розрахунку поправки суднових навігаційних курсопоказників.

З метою узагальнення відповідних знань у роботі визначено три класи елементів морехідної астрономії: основи сферичної та загальної астрономії (в частині подання координат світил, результатів їх вимірювання та результатів вимірювання часу); морські астрономічні інструменти (секстан, хронометр, зоряний глобус, нахиломір та інші); астронавігація (зокрема, методи визначення поправки компаса, визначення місця судна).

Наведена класифікація може бути основою як для вирішення завдань морехідної астрономії ручними інструментами (швидко, але з меншою точністю), так і для формування алгоритмів функціонування системи підтримки прийняття рішень для забезпечення точнішого автоматизованого вирішення відповідних завдань.

Надалі в роботі коротко розглядаються визначення часткових елементів морехідної астрономії, їх складові елементи (які за наявності використовуються в інтересах морехідної астрономії) та їх використання в контексті міжкласової взаємодії.

Ключові слова: морехідна астрономія, сферична астрономія, координати світил, вимірювання, морські астрономічні інструменти, секстан, астронавігація.

Постановка проблеми. Яку б високу ступінь надійності не мала навігаційна система, роль людського фактора переважаюча. А базові основи судноводіння завжди були й залишатимуться основними під час підготовки судноводія, відповідального за людські життя, збереження матеріальних цінностей і результати можливих екологічних наслідків у разі виникнення аварійної ситуації.

Наявність знань судноводіями астрономічних способів контролю місця розташування судна й роботи курсопоказника зображено в Міжнародній конвенції з дипломування та несення навігаційної вахти та є однією з основних вимог під час базової підготовки судноводія [1].

Абсолютна довіра супутниковим методам судноводіння значно підвищує ризик виникнення

аварійної ситуації. У відкритому морі наявність додаткової астрономічної інформації про місце положення судна, отриманої незалежно від роботи супутникових і радіонавігаційних систем, надає роботі судноводія впевненість у своїх діях. Особливо актуальним це стає в разі наближення судна до берега до початку можливості контролю роботи супутникових систем навігації радіолокаційними способами визначення місця судна.

Традиційні методи отримання незалежної астрономічної інформації в умовах дефіциту вільного часу в судноводія на вахті часто залишаються незатребуваними через трудоємність виконання астрономічних розрахунків. Наявність сучасних програм обробки астрономічних спостережень дозволяє зняти цю проблему. Однак кожен судноводій повинен знати принципи отримання астрономічних обсервацій і методи розрахунку поправки суднових навігаційних курсопоказників. Це можливо тільки тоді, коли зрозуміла фізика явищ добового й річного руху Сонця, зірок і планет Сонячної системи, співвідношення їх координат на небесній сфері й відповідних координат на Землі, а також інших елементів морехідної астрономії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Роботи В.Г. Кудрявцева, В.С. Давидова [2; 7], Д.А. Гагарського [3; 4], М.О. Килнаса, П.В. Зємова [5], В.Г. Алексишина, В.Т. Долгочуба, О.В. Белова [6],

Д.А. Новоселова [8], Н.А. Верюжского [9] присвячені теоретичним і практичним дослідженням в галузі морехідної астрономії. У роботі [10] проведено історичний екскурс розвитку морехідної астрономії.

Окремо необхідно виділити спеціалізовані міжнародні нормативні джерела щодо вимог розділу А-II/1 та А-II/2 конвенції ПДНВ78 з поправками 2010 року з необхідності знань судноводіями астрономічних способів контролю місця розташування судна й роботи курсопоказника [1].

Постановка завдання. Метою статі є формування базових принципів отримання астрономічних обсервацій і методів розрахунку поправки суднових навігаційних курсопоказників на основі аналізу основних елементів морехідної астрономії та їх взаємодії.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Морехідна астрономія – це частина практичної астрономії, яка розглядає орієнтування за небесними світилами в часі, за місцем і напрямом під час руху на морі [2].

Основними завданнями морехідної астрономії є:

- визначення місця судна в морі за небесними світилами;
- визначення справжніх напрямів щодо спостережуваних небесних світил (визначення поправки курсопоказника);

- визначення, зберігання та поширення точного часу;

- оцінка природного освітлення та астронавігаційної обстановки в районі плавання.

Астрономічне визначення місця судна в будь-якому районі плавання часто є єдиною можливістю і найбільш достовірною. Для його виконання не потрібні берегові споруди, а точність рішення астрономічних завдань не залежить від відстаней до берега. Астрономічне визначення поправки курсопоказника є практично майже єдиним засобом контролю за роботою курсопоказника під час плавання поза видимості земних орієнтирів.

Надалі часткові елементи морехідної астрономії будемо розглядати в рамках відповідних трьох основних класів елементів (рис. 1):

- основи сферичної та загальної астрономії (в частині подання координат світил, результатів їх вимірювання та результатів вимірювання часу);

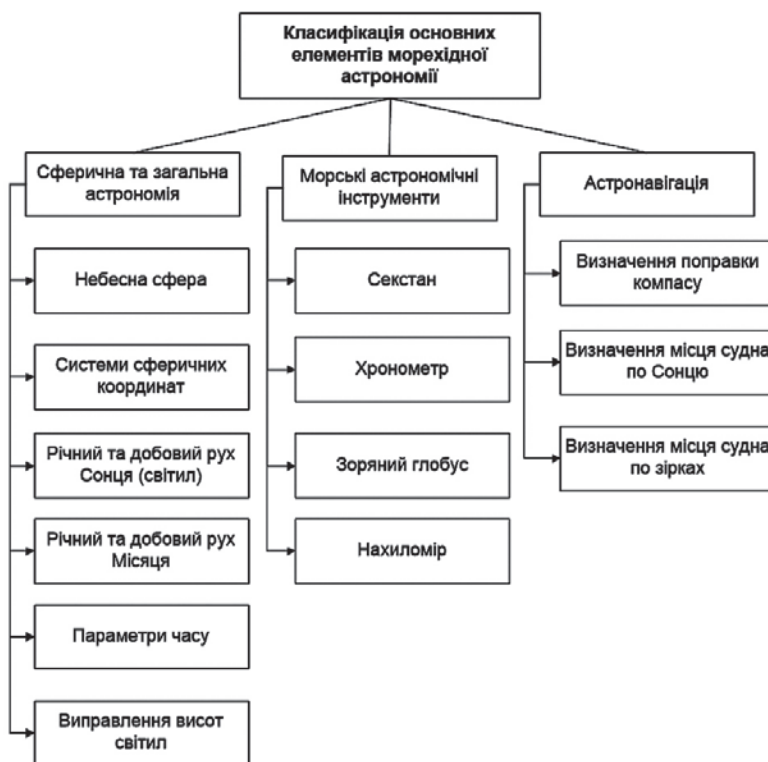


Рис. 1. Класифікація елементів морехідної астрономії

- морські астрономічні інструменти (секстан, хронометр, зоряний глобус, нахиломір та інші);
- астронавігація (зокрема, методи визначення поправки компаса, визначення місця судна).

Наведена класифікація може бути основою як для вирішення завдань морехідної астрономії ручними інструментами (швидко, але з меншою точністю), а так і для формування алгоритмів функціонування системи підтримки прийняття рішень (далі – СППР) для забезпечення точнішого автоматизованого вирішення відповідних завдань.

Надалі в роботі коротко розглядаються визначення часткових елементів морехідної астрономії, їх складові елементи (які за наявності використовуються в інтересах морехідної астрономії) та їх використання в контексті міжкласової взаємодії відповідно до рис. 1.

Небесна сфера. У морехідній астрономії за центр небесної сфери зазвичай приймають очі спостерігача або центр Землі. Небесною сферою називається сфера довільного радіуса з нанесеними на неї основними колами, напрямками й видимими місцями світил. Для спостерігача на Землі прямовисна лінія, яку представляють у центрі сфери (рис. 2) та

проходить через нього, перетинає небесну сферу в точках зеніту z і надира n [4].

Оскільки вісь світу перпендикулярна площині небесного екватора, а стрімка лінія перпендикулярна площині дійсного горизонту, то $\angle QOZ = \angle PNON$. Висотою називається дуга вертикала від площини дійсного горизонту до світила. Отже, висота підвищеного полюса дорівнює широті місця спостерігача.

Цей важливий висновок використовується для установки зоряного глобуса за широтою.

Системи сферичних координат. Дійсний рух Землі в просторі відбувається навколо Сонця. Для зручності рішення астрономічних завдань прийнято розглядати відносний рух, приймаючи Землю за нерухомий об'єкт, а світила як об'єкти, що рухаються по небесній сфері навколо осі світу. У морехідній астрономії основними є три системи координат – горизонтна, перша (I) екваторіальна і друга (II) екваторіальна системи координат (рис. 3).

У морехідній астрономії найчастіше доводиться працювати з горизонтною системою координат і I екваторіальною. У формулюванні будь-яких визначень координат завжди присутні 3 елементи:

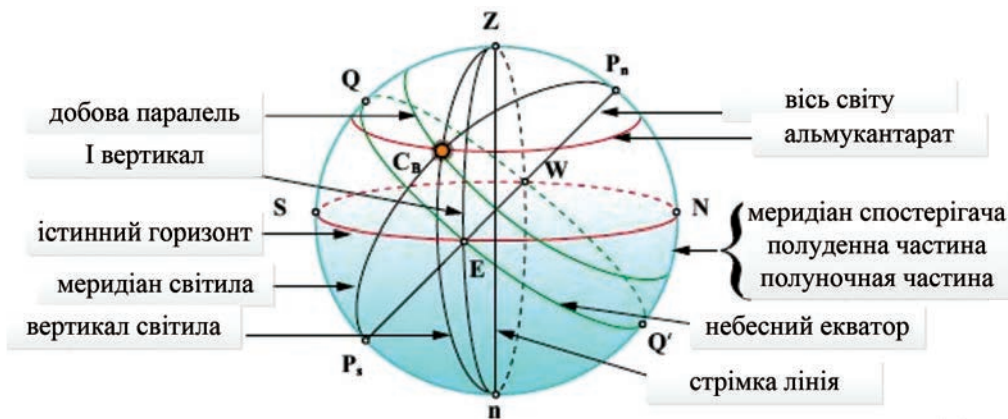


Рис. 2. Елементи небесної сфери, що використовуються в інтересах морехідної астрономії

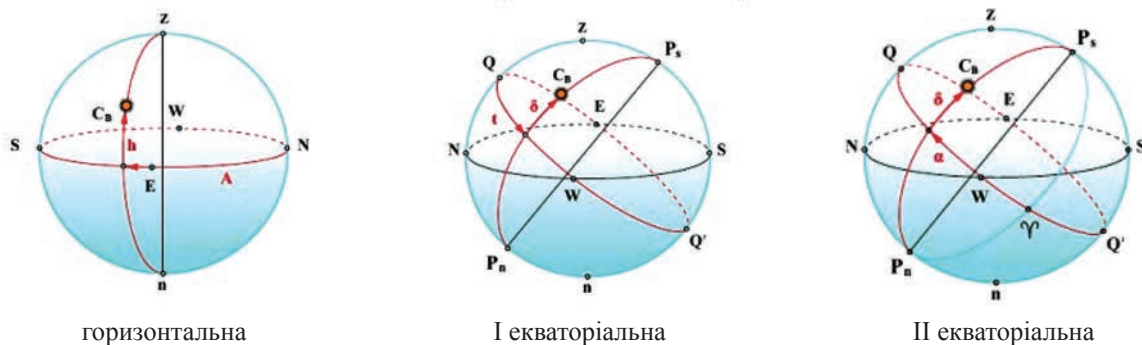


Рис. 3. Системи сферичних координат

- визначення дуги (небесного екватора, істинного горизонту, вертикала й так далі);
- звідки відлічується (від горизонту, від екватора, від меридіана й так далі);
- куди відраховується.

Причому одна координата визначається в основній площині, друга – в другій площині, перпендикулярній основній. Основна площина задає назву системи координат і входить у визначення кожної координати.

Річний і добовий рух світил. Уважаючи Землю нерухомою, небесній сфері надають обертання, зворотне добовому обертанню (з Е на W). У результаті цього всі світила, віддалені від небесного екватора на величину відмінювання δ , описують добові паралелі. Це – видимий рух світил унаслідок обертання Землі, зручний для подання фізики явищ і розв’язання задач. Під час добового руху стрімка лінія **zn**, меридіан спостерігача й істинний горизонт залишаються нерухомими, а світила разом зі сферою рухаються (рис. 4) [4]. Закони добового руху світил наведено в табл. 1.

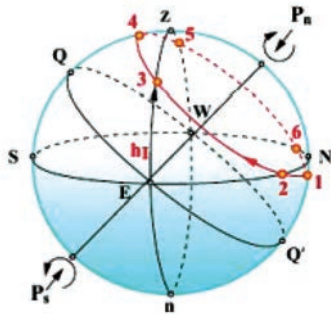


Рис. 4. Приклад зображення процесу обертання небесної сфери відбувається за годинниковою стрілкою, якщо дивитися на сферу уздовж осі світу з боку північного полюса

Річний і добовий рух Місяця. Місяць є природним супутником Землі. Він обертається

навколо Землі за еліптичною орбітою. Площина місячної орбіти нахилена до площини екліптики в середньому під кутом $5^{\circ}09'$. Отже, схилення Місяця змінюється в межах $0^{\circ} << 28^{\circ}36'$. Рух Місяця щодо Землі має важливе значення для судноводіння, тому що від цього залежать припливи.

Якщо протягом 1–2 годин простежити за положенням Місяця відносно будь-якої яскравої зірки, то можна переконатися в тому, що Місяць переміщується назустріч добовому обертанню (на схід) приблизно на величину свого діаметра за 1 годину. За добу Місяць проходить по своїй орбіті дугу в 13,2. Отже, повний оборот по небесній сфері Місяць зробить за $360^{\circ}/13,2 = 27,27$ доби.

Параметри часу. У морехідній астрономії важливу роль відіграє зоряний час. Зоряним цілодобово називається проміжок часу повного оберту Землі щодо точки Овна. За початок зоряної доби приймається момент верхньої кульмінації точки весняного рівнодення. Зоряний час прийнято позначати буквою S. Такий вираз формально представляє основну формулу часу:

$$S = t + \alpha, \tag{1}$$

де t – західний годинний кут;

α – пряме сходження зірки.

Вираз (1) пов’язує координати світил із часом і надає можливість переходити від зоряного часу до сонячного й вирішувати інші важливі завдання.

Виправлення висот світил. Для отримання obserвованих координат місця судна в морі необхідно мати вимір навігаційного параметра. Цим параметром є виміряна секстаном висота світила в конкретний час. Вимірювання висоти світила проводиться як вимір спостерігачем на судні кута між видимим місцем світила й видимим горизонтом. Рішення повного завдання астрономічним способом можливе за наявності сферичних координат t і δ виміряного світила. З огляду на те, що ці координати геоцентричні, тобто центр небесної сфери

Таблиця 1

Закони добового руху світил

Світило	Явище	Умови явища
C1	Проходить через зеніт	$\delta = \varphi$; δ та φ однойменні
C2	Світило сходить у чверті, однойменної з широтою, перетинає I вертикал, кульмінує, знову перетинає I вертикал і заходить у чверті, однойменної з широтою – тобто в добовому русі над горизонтом світило знаходиться в 4-х чвертях	$\delta < \varphi$; δ та φ однойменні
C3	Світило I вертикал ніколи не перетинає, знаходиться тільки у 2-х чвертях, однойменних із широтою	$\delta > \varphi$; δ та φ однойменні
C4	Не заходить	$\delta > 90 - \varphi$; δ та φ однойменні
C5	У добовому русі світило I вертикал над горизонтом не перетинає, знаходиться тільки у 2-х чвертях, різнойменних із широтою	$\delta < 90 - \varphi$; δ та φ різнойменні
C6	Не сходить	$\delta > 90 - \varphi$; δ та φ різнойменні

збігається із центром Землі, виміряну висоту необхідно привести до центру Землі. Також необхідно врахувати вплив атмосфери Землі й кліматичних умов поверхні Землі в місці спостережень на виміряну секстаном висоту світила.

У рамках розгляду класу морських астрономічних інструментів у роботі обмежимося розглядом секстану (частково він вже згадувався під час розгляду виправлення висот світил).

Секстан – це інструмент для визначення висоти світила над горизонтом, а також вертикальних і горизонтальних кутів між орієнтирами. Секстан необхідний для вимірювання висот світил над горизонтом під час визначення місця судна по Сонцю днем або в період вечірніх або ранкових сутінків по зірках, коли одночасно видно горизонт і світила та є можливість виміряти висоти цих світил над горизонтом.

Принцип дії секстана заснований на законі оптики: промінь падаючий, промінь переломлений і перпендикуляр, проведений до кордону розділу в точці падіння, лежать в одній площині, наведений на рис. 5 [4].

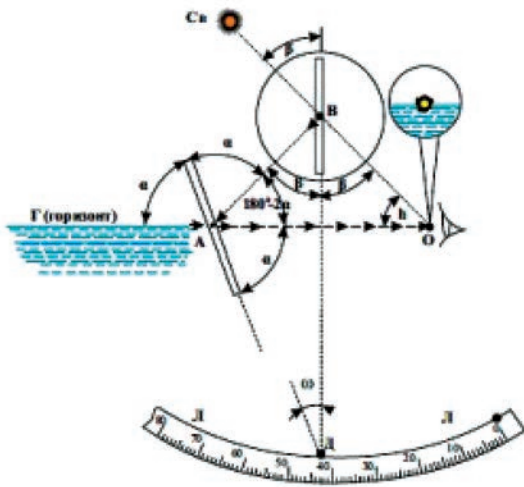


Рис. 5. Принцип дії секстана

Під час роботи із секстаном необхідно періодично виконувати його повірки. Робота судноводія в разі нормального використання секстана без великих перепадів температур та ударів не вимагає щоденного виконання всіх перевірок, але потребує визначення поправки індексу перед спостереженнями з метою її урахування під час виправлення висот світил.

Визначення поправки компасу астрономічними способами може проводитися загальним способом днем за Сонцем і вночі по зірках (планетах). Часткові способи з можливістю спрощення

розрахунків виконуються по сходу або заходу будь-якого світила (Сонця вранці або ввечері), а також за Полярною зіркою вночі. Розрахунок азимута на світило (Сонце, планети, зірки) загальним способом рекомендується виконувати за формулою сферичної тригонометрії, отриманою на підставі формули котангенсів:

$$A = \arctan[\sin t / (\tan \delta \cos \varphi - \cos t \sin \varphi)]. \quad (2)$$

Визначення місця судна по Сонцю та зірках.

Для отримання obserвованих координат місця судна необхідно провести спостереження світил:

- Сонця (вдень) – визначення місця судна по Сонцю;
- зірок і планет у період ранкових або вечірніх сутінків – визначення місця судна по зірках.

Практика спостережень Місяця зустрічається рідко через можливості допуску значних помилок під час вимірів висот.

Для вирішення завдання визначення місця судна по Сонцю або зірках розрахунки виконуються різними способами. Можливі варіанти розрахунків:

- «повністю вручну» з використанням таблиць і графічної побудови для отримання obserвованих координат;
- із частковим застосуванням таблиць – для розрахунків часових кутів світил, калькулятора – для розрахунку висот та азимутів світил за формулами сферичної тригонометрії, графічної побудови – для отримання obserвованих координат;
- за допомогою астрономічних програм на комп'ютері з автоматизованим розрахунком obserвованих координат (або, наприклад, з використанням системи підтримки прийняття рішень).

Для отримання obserвацій по Сонцю та зірках після підготовки до спостережень необхідно провести вимірювання, що містять:

- фіксування висоти світил секстаном;
- фіксування часу вимірювання висот світил за допомогою наявного на судні зберігача часу.

Висновки. Отже, в статті проведено аналіз основних елементів морехідної астрономії та їх взаємодії з метою формування базових принципів отримання астрономічних obserвацій і методів розрахунку поправки судових навігаційних курсопоказників; визначено три класи елементів морехідної астрономії: основи сферичної та загальної астрономії (в частині представлення координат світил, результатів їх вимірювання та результатів вимірювання часу); морські астрономічні інструменти (секстан, хронометр, зоряний глобус, нахиломір та інші); астронавігація (зокрема, методи визначення поправки компасу,

визначення місця судна). Наведена класифікація може бути основою як для вирішення завдань морехідної астрономії ручними інструментами (швидко, але з меншою точністю), такі для фор-

мування алгоритмів функціонування системи підтримки прийняття рішень для забезпечення точнішого автоматизованого вирішення відповідних завдань.

Список літератури:

1. Silverberg J. Nautical Astronomy : From the Sailings to Lunar Distances. *Navigation*. May 2006. 24 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/259911622_Nautical_Astronomy_From_the_Sailings_to_Lunar_Distances (дата звернення: 02.09.2021).
2. Кудрявцев В.Г., Давыдов В.С. Мореходная астрономия : учебное пособие. 3 изд. Киев : Лира-К, 2019. 380 с.
3. Гагарский Д.А. Мореходная астрономия для начинающих судоводителей : учебное пособие. Москва : МОРКНИГА, 2020. 221 с.
4. Гагарский Д.А. Мореходная астрономия : учебное пособие. Берлин : Директ-Медиа, 2021. 208 с.
5. Килнас М.О. Земов П.В. Роль мореходной астрономии в навигационной безопасности плавания. *Актуальные проблемы и перспективы развития системы отраслевого транспортного образования* : II Всероссийская научно-практическая конференция, г. Казань, 6 июня 2020 р. Казань, 2020. С. 8.
6. Алексишин В.Г., Долгочуб В.Т., Белов О.В. Практическое судовождение : учебное пособие. 2 изд. Одесса : Феникс – Одесская национальная морская академия, 2006. 376 с.
7. Михайлов В.С., Кудрявцев В.Г., Давыдов В.С. Практическая мореходная астрономия : учебник. Киев : Киевская государственная академия водного транспорта им. гетмана Петра Конашевича-Сагайдачного, 2009. 293 с.
8. Новоселов Д.А. Мореходная астрономия : методические указания. Керчь : Керченский государственный морской технологический университет, 2016. 60 с.
9. Верюжский Н.А. Мореходная астрономия: Практическое пособие по решению астронавигационных задач : учебное пособие. Москва : ТрансЛит, 2007. 160 с.
10. Международная конвенция о Подготовке и дипломировании моряков и несении вахты. 2011. *Мурманский государственный технический университет* : веб-сайт. URL: <http://www.mstu.edu.ru/education/files/pdnpv.pdf> (дата звернення: 23.09.2021).

Ivanenko V.M., Fedunov V.M., Urum N.S., Bajak O.V. ANALYSIS OF THE BASIC ELEMENTS OF NAVIGATION ASTRONOMY

The article analyzes the main elements of seafaring astronomy and their interaction. Their main purpose is to form the basic principles of obtaining astronomical observations and methods for calculating the correction of ship navigation course indicators. The direct need for knowledge of pilots of astronomical methods of control of the location of the vessel and the operation of the index is reflected in the International Convention on the Certification and Navigation of the Navigation Watch and is one of the main requirements for basic training of the navigator. Absolute confidence in satellite navigation methods significantly increases the risk of an emergency. In the high seas, the availability of additional astronomical information about the position of the ship, obtained independently of the operation of satellite and radio navigation systems, gives the work of the pilot confidence in their actions. This becomes especially relevant when the vessel approaches the shore before the possibility of monitoring the operation of satellite navigation systems by radar methods of determining the location of the vessel. Traditional methods of obtaining independent astronomical information in conditions of shortage of free time for the watchman often remain unclaimed due to the complexity of astronomical calculations. The availability of modern programs for processing astronomical observations can eliminate this problem. However, every navigator must know the principles of obtaining astronomical observations and methods of calculating the correction of ship navigation course indicators. In order to generalize the relevant knowledge in the work identified three classes of elements of marine astronomy: the basics of spherical and general astronomy (in terms of representation of the coordinates of the lights, the results of their measurement and the results of time measurement); marine astronomical instruments (sextant, chronometer, star globe, inclinometer, etc.); astronavigation (including methods for determining the compass correction, determining the position of the ship). The given classification can be a basis both for the decision of problems of seafaring astronomy by manual tools (quickly, but with less accuracy), and also a basis for formation of algorithms of functioning of system of decision support to provide more exact automated decision of the corresponding problems. In the following, the paper briefly considers the definitions of partial elements of seafaring astronomy, their constituent elements (which, if any, are used in the interests of seafaring astronomy) and their use in the context of interclass interaction.

Key words: nautical astronomy, spherical astronomy, coordinates of luminaries, measurements, marine astronomical instruments, sextant, astronavigation.