

DETERMINATION OF THE VESSEL'S POSITION COORDINATES BY THE ALTITUDE DIFFERENCE OBSERVATION

ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ МІСЦЯ СУДНА ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ РІЗНИЦІ ВИСОТ СВИТИЛ

O. Raynov, senior lecturer

О. О. Райнов, старший викладач

National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

Currently, in ocean navigation, one of the backup methods, and often the only one, is the astronomical method of determining the ship's position. To jointly determine the latitude and longitude of a place from the end of the 19th century to the present day, only one navigation parameter is used - the altitude, although in nautical astronomy other navigation parameters can theoretically be used - altitude difference, sum of altitude, azimuth, azimuth difference, etc. In practice, there is no acceptable method for determining the latitude and longitude of a ship's position from the measured altitude difference. The existing method of position lines for plotting isolines on a navigation map makes it possible to develop a method acceptable for navigation practice for determining the latitude and longitude of a vessel from the measured altitude difference. In this study, the author justifies the practical possibility of determining the coordinates of a vessel astronomically from the altitude difference, based on separate measurements of the altitude with a navigation sextant. The developed method for determining the coordinates of a ship's location from the measured altitude difference allows us to significantly increase the accuracy of determining the latitude and longitude of the ship's location by reducing the influence of random method errors caused by the geographical coordinates of the ship's location and the position of the Luminary illumination pole on the Earth's surface, as well as eliminating the influence of systematic altitude measurement errors. Another advantage of the method is that it is completely autonomous and makes it possible to use the sextant for measurements available on board.

Keywords: celestial navigation, position measurement, astronomical ship positioning, altitude difference.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Для підвищення безпеки мореплавання у зв'язку з постійним ростом інтенсивності судноплавства, а також дефіцитом часу у штурманів, потрібно збільшення можливостей астрономічного визначення місця судна, і в першу чергу, підвищення точності і швидкості визначення координат місця - його широти і довготи.

У роботі [3] показано, що точність визначення широти і довготи місця залежить, головним чином, від географічних координат місця судна і місця полюса освітленості світила на поверхні Землі, а також від погрішностей у вимірюванні висоти світила. Проте нині вплив географічних координат місця судна і місця полюса освітленості світила на поверхні Землі на точність визначення широти і довготи місця не враховується. Це може привести до погрішностей у визначуваному місці судна, що перевищує теоретичні на порядок. Вплив географічних координат місця судна і місця полюса освітленості світила

можна, як показано в роботі [3], врахувати вибором світил для заданого часу і місця спостережень.

Серед погрішностей виміру висоти світила основну роль грають систематичні погрішності. До них, в першу чергу, відносяться погрішності через:

- 1) зміщення осі обертання аліада секстана відносно центру дуги лімба;
- 2) відхилення нульового кута відліку секстана від нуля внаслідок деформацій рами секстана і зміни положення його дзеркал;
- 3) неврахованої добової і річної зміни коефіцієнта земної рефракції при введенні табличної поправки за нахил горизонту та ін. [4].

Величини цих систематичних погрішностей можуть складати декілька хвилин, а усунути їх повністю в умовах судна не представляється можливим.

Використання навігаційного параметра різниці висот світил дозволяє:

- 1) врахувати залежність погрішностей у визначенні широти і довготи місця судна від географічних координат місця судна і місця полюса освітленості світила на поверхні Землі від погрішностей у вимірюваній висоті світила;
- 2) виключити вплив систематичних погрішностей виміру висот світил на погрішності у визначенні координат судна і на цій основі значно підвищити точність визначення координат місця судна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Нині практичне застосування на судні має лише метод висотних ліній положення. Для підвищення точності і швидкості визначення координат місця судна останнім часом були запропоновані нові методи. Велика частина їх ґрунтується на аналітичному рішенні рівняння круга рівних висот, що дозволяє позбавитися від графічних побудов з їх недоліками і дещо автоматизувати обчислення. Наприклад, в роботах [5,6] запропоновано рішення системи рівнянь кругів рівних висот методом послідовних ітерацій, а в роботі [7] методом Ньютона. У роботі [8] використані еволюційні алгоритми в штучному інтелекті для застосування генетичного алгоритму оптимізації рою часток для визначення оптимального положення судна. Автономний метод позиціонування в небесній навігації був представлений в роботі [9] як для стаціонарних спостерігачів, так і таких, що рухаються. Автор в роботі [10] визначає місце судна шляхом рішення рівняння різниці висот методом найменших квадратів. Використання зліченої та обсервованої висот в рівнянні різниці висот дозволяє визначити шукані координати судна лише по одному світилу. Проте все ж таки потрібне використання більшої кількості світил, щоб виключити можливий промах. Усі ці методи не автономні, оскільки вимагають відповідного устаткування і програмного забезпечення. До того ж вони не дозволяють зменшити вплив випадкових погрішностей, обумовлених географічними координатами місця судна і положенням полюса освітленості світила на поверхні Землі, а також виключити вплив систематичних погрішностей виміру висот світил. Запропонований в роботі [11] автономний інтерактивний ітераційний метод навігації, пов'язаний з позиціонуванням і орієнтацією, заснований на поляризації небесного світла, виявився занадто складним для застосування на борту судна. У методах, описаних в роботах [12-14], при визначенні місця судна використовується нова навігаційна величина - азимут світила, а в роботі [15] - комбінація її з висотою світила, проте усі вони також неавтономні і не дозволяють зменшити вплив випадкових погрішностей, обумовлених географічними координатами місця судна і положенням полюса освітленості світила на поверхні Землі, і до того ж вимагають наявності на судні високоточного приладу для виміру азимутів світил.

Елементи ліній положення рівної різниці висот (сферичної гіперболи) приведені у ряді вітчизняних робіт [16-19]. Однак у перерахованих роботах сферична гіпербола розглядалася тільки для випадків користування фазовим зондом. У роботі [2] наводиться аналітичне рішення двох різницево-висотних ліній положення, засноване на попередніх

роботах, але стосовно розрахунків астрономічних ліній положення. Це дозволяє виключити вплив систематичних погрішностей виміру висот світил на погрішності у визначенні координат судна і піти від графічної побудови ліній положення на карті, і на цій основі значно підвищити точність визначення координат місця судна. Проте це аналітичне рішення не отримало практичного застосування в судноводінні. На сьогодні на практиці не існує прийнятної методики для визначення широти і довготи місця судна по вимірній різниці висот світил. Проте факт наявності методу ліній положення для прокладення ізоліній на карті дозволяє розробити прийнятну для практики судноводіння методику визначення широти і довготи місця судна по вимірній навігаційним секстантом різниці висот світил.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Мета статті - обґрунтувати практичну можливість визначення широти і довготи судна астрономічним способом по різниці висот світил, отриманій на основі роздільних вимірів висот світил навігаційним секстантом.

Для досягнення мети статті необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) визначити умови вибору світил для забезпечення заданої точності визначення широти і довготи місця судна;
- 2) визначити порядок проведення вимірів і виправлення висот;
- 3) визначити порядок прокладення ізоліній сферичних гіпербол, як ліній положення на карті.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Обмежимо наше дослідження спостереженнями під час ранкових і вечірніх сутінків світил - зірок. Період часу можливого спостереження світил в навігаційних сутінках дуже короткий. Тому для заданої широти місця судна φ на практиці місцевий зоряний час навігаційних сутінків для початку обсервацій зазвичай передобчислюється.

Проте не усі світила можуть забезпечити необхідну точність визначення широти і довготи місця судна. Так, в роботі [3] отримані вирази для розрахунку чутливості у визначуваній широті і довготі місця судна залежно від приростів у вимірюваній висоті світила, величини вимірної висоти, координат місця судна і координат вибраного для спостережень світила:

$$\Delta\varphi_h = \cosh \cdot (\cos \varphi \cdot \sin \delta - \sin \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t_m)^{-1} \cdot \Delta h, \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_h = -\cosh \cdot (\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin t_m)^{-1} \cdot \Delta h, \quad (2)$$

де h - вимірня висота світила; $t_m = t_{cp} + \lambda$ - місцевий годинний кут світила; δ і t_{cp} - схилення і грінвічський годинний кут світила, які є географічними координатами світила на карті - його полюса освітленості: географічна широта полюса освітленості дорівнює схиленню світила δ , а географічна довгота полюса освітленості - грінвічському годинному куту світила t_{cp} ; $\Delta\varphi_h$ - зміни широти місця судна при зміні вимірюваної висоти світила на величину Δh ; $\Delta\lambda_h$ - зміни довготи місця судна при зміні вимірюваної висоти світила на величину Δh .

За погрішність виміру висот секстантом Δh можна прийняти стандартну погрішність $\varepsilon_h = 1,0'$ [4]. Приймемо, що $\Delta\varphi_h = \Delta\lambda_h = \varepsilon_h$. На цій основі, прирівнюючи (1) і (2), отримаємо умови, при яких погрішності визначення широти і довготи місця судна через погрішності, обумовлених впливом географічних координат місця судна і місця полюса освітленості світила на поверхні Землі, і через погрішності у вимірі висот, можна врахувати шляхом

вибору світил для заданого часу спостережень. При цьому погрішності визначення широти і довготи місця судна будуть рівні і не перевищать $1,0'$:

$$\operatorname{tg} \varphi \cdot \cos t_m - \sin t_m - \operatorname{tg} \delta = 0 \quad (3)$$

де t_m - місцевий годинний кут світила на момент початку навігаційних сутінків, δ - схилення світила.

У цьому рівнянні єдиним параметром, який можна вибирати в заданих умовах навігаційних сутінків і заданого місця судна, є схилення світил.

Звертаємо увагу на те, що азимути або різниці азимутів світил не впливають на вибір світил для спостережень і на точність визначення широти і довготи місця судна.

Вирішуючи (3) відносно δ при заданих φ і t_m , отримуємо формулу для розрахунку оптимального значення схилення зірки, при якій забезпечуються умови рівності (3):

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos t_m - \sin t_m, \quad (4)$$

Після вирішення рівняння (4) для підбору зірок по оптимальному схиленню можна використати зоряний глобус або Star-Finder.

Крім того, для взаємного виключення впливу астрономічної рефракції, підбирати зірки треба так, щоб їх висоти відрізнялися не більше, ніж на 5° .

Припустимо, що для спостережень вибрані, як вказано вище, три світила - перше, друге і третє.

Висоти світил вимірюються в звичайному порядку, як це передбачено для випадку визначення місця судна за зірками [1]. Виміряні висоти приводяться до одного моменту і одного зеніту відомими прийомами. Більше ніякі виправлення вимірних висот не потрібно.

Особливістю безпосередніх вимірів буде те, що обертати відліковий барабан секстана при усіх трьох вимірах і при введенні поправок необхідно тільки в один бік - на збільшення або на зменшення.

За даними вимірів висот світил розраховується різниця висот.

За допомогою комп'ютерних програм, калькулятора або таблиць розраховуються три злічені різниці висот, наприклад, між першим і другим світилом, між другим і третім і між третім і першим. На цій основі визначаються перенесення обсервованих ізоліній сферичних гіпербол від злічених.

Для прокладення ізоліній сферичних гіпербол на карті скористаємося методом ліній положення.

Відомо, що дотична і нормаль до гіперболи у будь-якій її точці є бісектрисами відповідно внутрішнього і зовнішнього кутів, утворених радіус-векторами, проведеними з фокусів гіперболи в точку дотику [19]. У нашому випадку цими радіус-векторами є виміряні висоти світил, а кут, утворений ними, - це різниця азимутів між світилами.

Замінімо сферичну гіперболу дотичної до неї в зліченій точці. Тоді напрям нормалі до дотичної в зліченій точці буде дорівнювати:

$$A_n = 0,5 \cdot (180^\circ + A_1 - A_2), \quad (5)$$

де A_1 і A_2 - азимути вимірних висот, які розраховуються за допомогою комп'ютерних програм, калькулятора або відповідних таблиць.

Прокладення на карті робиться в наступному порядку:

1) через злічену точку проводиться нормаль до дотичної під кутом, розрахованим по формулі (5);

2) на цій лінії відкладається перенесення лінії положення від зліченої точки;

3) від перенесення проводиться лінія перпендикулярно нормалі, яка буде ділянкою обсервованої ізолінії сферичної гіперболи (рис. 1).

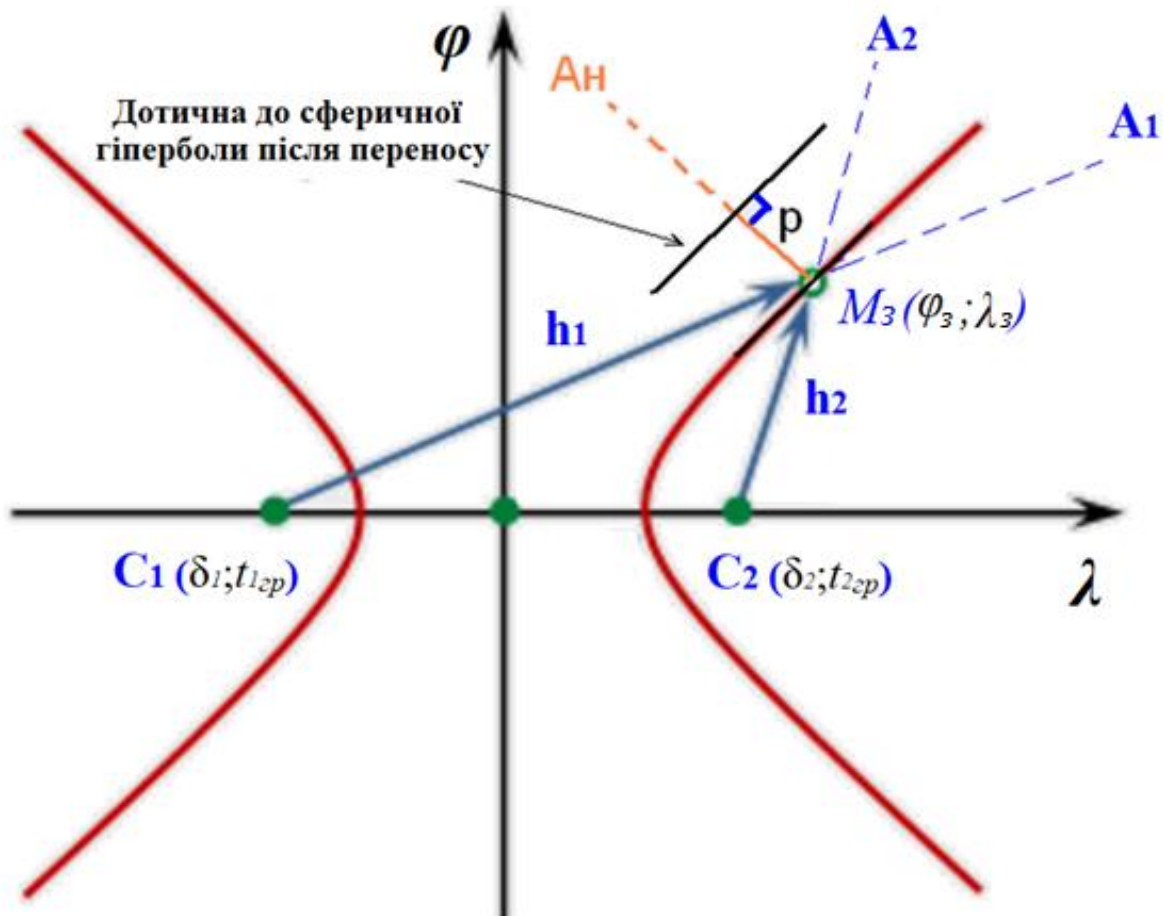


Рис. 1. Застосування методу висотної лінії положення до сферичної гіперболи

C_1, C_2 - полюси освітленості світл; h_1, h_2 - висоти відповідних світл; M_3 - злічене місце судна з координатами φ_3 і λ_3 ; p - перенесення; A_1, A_2 - азимути відповідних світл; A_n - азимут нормалі до дотичної до сферичної гіперболи.

Характеристикою точності місця судна буде прямокутник із сторонами по довготі і широті, рівними сумарним випадковим погрішностям у визначенні широти і довготи.

Точність визначення широти і довготи місця судна по кожній вимірній висоті залежатиме від того, чи дотримується умова (4).

Якщо умова (4) для усіх вимірних висот дотримується, то випадкові погрішності у визначенні широти і довготи місця судна в кожній з висот не перевищуватимуть $1,0'$ [3]. Тоді сумарні випадкові погрішності у визначенні широти і довготи місця судна по вимірних різницях трьох висот світл будуть рівні (хв. дуги):

$$\varepsilon_{\varphi\Sigma} = \varepsilon_{\lambda\Sigma} \leq t \cdot \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2}, \quad (6)$$

де t - число, яке залежить від закону розподілу випадкової величини - погрішності вимірів навігаційного параметра і заданої довірчої вірогідності [20]; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ і ε_3 - випадкові погрішності вимірів першої, другої і третьої висоти.

Приймемо, наприклад, що випадкова погрішність виміру висоти зірки над видимим горизонтом дорівнює $0,5'$ [1]. Виміри висот світл одним і тим же спостерігачем і одним і тим же секстаном впродовж короткочасних сутінків можна вважати рівноточними. Тоді для $t = 2$ сумарні випадкові погрішності у визначенні широти і довготи місця судна по вимірних різницях трьох висот світл, які розраховані по формулі (6), дорівнюватимуть $1,8'$. Характеристикою точності місця судна для довірчої вірогідності $0,95$ буде прямокутник із сторонами по довготі і широті $1,8'$.

Для вимірних висот, у яких умова (4) не дотримується, $\varepsilon_{\varphi\Sigma}$ і $\varepsilon_{\lambda\Sigma}$ не рівні між собою. Фактичні випадкові погрішності у визначенні широти $\varepsilon_{\varphi i}$ і довготи $\varepsilon_{\lambda i}$ місця судна по кожній з і -тої вимірних висот в цьому випадку визначатимуться по формулах [3]:

$$\varepsilon_{\varphi i} = \cosh \cdot (\cos \varphi \cdot \sin \delta - \sin \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t_m)^{-1} \cdot \varepsilon_h, \quad (7)$$

$$\varepsilon_{\lambda i} = -\cosh \cdot (\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin t_m)^{-1} \cdot \varepsilon_h, \quad (8)$$

де h - вимірjana висота світила; φ і λ - широта і довгота місця судна; δ і t_m - схилення і грінвічський годинний кут світила, які є географічними координатами світила на карті, - його полюсу освітленості: географічна широта полюса освітленості дорівнює схиленню світила δ , а географічна довгота полюса освітленості - місцевому годинному куту світила t_m ; ε_h - випадкова погрішність виміру висоти.

При недотриманні умови (4) сумарні випадкові погрішності у визначенні широти і довготи місця судна визначатимуться за формулою (6) окремо для широти і довготи з урахуванням фактичних випадкових погрішностей у визначенні широти $\varepsilon_{\varphi i}$ і довготи $\varepsilon_{\lambda i}$ місця судна по кожній вимірній висоті, розрахованих по формулах (7) і (8).

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

В результаті проведеного дослідження була розроблена методика визначення координат місця судна по різниці вимірних висот світил. Ця методика дозволяє значно підвищити точність визначення широти і довготи місця судна за рахунок:

1) зменшення впливу випадкових погрішностей методу, обумовлених географічними координатами місця судна і положенням полюса освітленості світила на поверхні Землі;

2) виключення впливу систематичних погрішностей виміру висот світил.

Для ефективного впровадження запропонованого методу в практику судноводіння доцільним є розробка комп'ютерної програми для забезпечення автоматичних розрахунків по:

1) підбору оптимальних схилень світил по формулі (4);

2) визначенню напрямку нормалі до дотичної в зліченій точці по формулі (5);

3) визначенню фактичних випадкових погрішностей в широті і довготі місця судна для кожної з вимірних висот по формулах (7) і (8);

4) визначенню сумарних випадкових погрішностей в широті і довготі місця судна по формулі (6).

ЛІТЕРАТУРА

1. Красавцев Б.И. Мореходная астрономия: учебник для вузов. М.: Транспорт, 1986.
2. Гаврюк М.И. Астронавигационные определения места судна. М.: Транспорт, 1973.
3. Бобыр В.А., Райнов А.О. Чувствительность судовой эргатической функции определение места. Судовождение: Сб. научн. трудов / НУ ОМА, Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2017. - С. 15-25.
4. Кондрашихин В.Т. Теория ошибок и ее применение к задачам судовождения. М.: Транспорт, 1969.
5. Vulfovich B., & Fogile V. New ideas for celestial navigation in the third millennium. The Journal of Navigation, 2010, 63(2): 373-378. <https://doi.org/10.1017/S0373463309990348>
6. Hsu T.-P.; Weng G.-Y.; Chen C.-L.. A modified Sumner method for obtaining the astronomical vessel position. J. Mar. Sci. Technol. 2017, 25, 319-328.
7. Chih-Li C., Tien-Pen H., and Jiang-Ren C. A novel approach to determine the astronomical vessel position. Journal of Marine Science and Technology, 2003, 11(4): 221-235.

8. Ming-Cheng T. Genetic algorithm for solving celestial navigation fix problems. *Polish Maritime Research*, 2012, 19(3): 53-59, doi: 10.2478/v10012-012-0031-5
9. Pierros F. Stand-alone celestial navigation positioning method. *The Journal of Navigation*, 2018, 71(6): 1344-1362, doi: 10.1017/S0373463318000401
10. Nguyen Thai, D. (2022). Determining the ship's position by the celestial altitude difference based on the least square method. *Journal of Marine Science and Technology*, 65(65), 05–09.
11. Zhang J., Yang J., Wang S., Liu X., Wang Y., and Yu X. A self-contained interactive iteration positioning and orientation coupled navigation method based on skylight polarization. *Control Engineering Practice*, 2021, 111: 104810, doi: 10.1016/j.conengprac.2021.104810
12. Van-Suong N., Nam-Kyun I. M., and Quang-Dan D. Azimuth method for ship position in celestial navigation. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, 2017, 7: 55-62, doi: 10.1016/j.enavi.2017.06.006
13. Lusic Z. Astronomical position without observed altitude of the celestial body. *The Journal of Navigation*, 2018, 71(2): 454-466, doi: 10.1017/S037346331700073X
14. Nguyen V. S. A novel approach to determine the ship position with an azimuth of celestial body and factors of ship route. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2019, 10(2): 1162-1167.
15. Ющенко А.П., Лесков М.М. Навигация. М.: Транспорт, 1965.
16. Белобров А.П. Фазовые радионавигационные системы в гидрографии и океанологии. Л.: Гидрометеиздат, 1961.
17. Попеко Г.П., Саломатин Е.П. Навигация. Курс кораблевождения. Л.: УГС ВМФ, 1961.
18. Баранов Ю.К. Использование радиотехнических средств в судовождении. М.: Морской транспорт, 1963.
19. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУзов. М.: Наука, 1980.
20. Бобыр В.А. Судовые эргатические функции: монография. К.: Кафедра, 2014.

REFERENCES

1. Krasavtsev B.I. *Morekhodnaya astronomiya: uchebnik dlya vuzov*. М.: Transport, 1986. [in Russian].
2. Gavryuk M.I. *Astronavigatsionnye opredeleniya mesta sudna / M.I. Gavryuk*. - М.: Transport, 1973. - 176 s. [in Russian].
3. Bobyр V.A., Raynov A.O. *Chuvstvitelnost sudovoy ergaticheskoy funktsii opredelenie mesta. Sudovozhdenie: Sb. nauchn. trudov / NU OMA, Vyp. 27. – Odessa: «IzdatInform», 2017. - S. 15-25. [in Russian].*
4. Kondrashikhin V.T. *Teoriya oshibok i ee primeneniye k zadacham sudovozhdeniya*. М.: Transport, 1969. [in Russian].
5. Vulfovich B., & Fogile V. New ideas for celestial navigation in the third millennium. *The Journal of Navigation*, 2010, 63(2): 373-378, doi: 10.1017/S0373463309990348
6. Hsu T.-P.; Weng G.-Y.; Chen C.-L. A modified Sumner method for obtaining the astronomical vessel position. *J. Mar. Sci. Technol.* 2017, 25, 319-328.
7. Chih-Li C., Tien-Pen H., and Jiang-Ren C. A novel approach to determine the astronomical vessel position. *Journal of Marine Science and Technology*, 2003, 11(4): 221-235.

8. Ming-Cheng T. Genetic algorithm for solving celestial navigation fix problems. *Polish Maritime Research*, 2012, 19(3): 53-59, doi: 10.2478/v10012-012-0031-5
9. Pierros F. Stand-alone celestial navigation positioning method. *The Journal of Navigation*, 2018, 71(6): 1344-1362, doi: 10.1017/S0373463318000401
10. Nguyen Thai, D. (2022). Determining the ship's position by the celestial altitude difference based on the least square method. *Journal of Marine Science and Technology*, 65(65), 05–09.
11. Zhang J., Yang J., Wang S., Liu X., Wang Y., and Yu X. A self-contained interactive iteration positioning and orientation coupled navigation method based on skylight polarization. *Control Engineering Practice*, 2021, 111: 104810, doi: 10.1016/j.conengprac.2021.104810
12. Van-Suong N., Nam-Kyun I. M., and Quang-Dan D. Azimuth method for ship position in celestial navigation. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, 2017, 7: 55-62, doi: 10.1016/j.enavi.2017.06.006
13. Lusic Z. Astronomical position without observed altitude of the celestial body. *The Journal of Navigation*, 2018, 71(2): 454-466, doi: 10.1017/S037346331700073X
14. Nguyen V. S. A novel approach to determine the ship position with an azimuth of celestial body and factors of ship route. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2019, 10(2): 1162-1167.
15. Yushchenko A.P., Leskov M.M. *Navigatsiya*. M.: Transport, 1965. [in Russian].
16. Belobrov A.P. *Fazovye radionavigatsionnye sistemy v gidrografii i okeanologii*. L.: Gidrometeoizdat, 1961. [in Russian].
17. Popeko G.P., Salomatin Ye.P. *Navigatsiya. Kurs korablevozhdeniya*. L.: UGS VMF, 1961. [in Russian].
18. Baranov Yu.K. *Ispolzovanie radiotekhnicheskikh sredstv v sudovozhdenii*. M.: Morskoy transport, 1963. [in Russian].
19. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya VTU-zov*. M.: Nauka, 1980. [in Russian].
20. Bobyr V.A. *Sudovye ergaticheskie funktsii: monografiya*. K.: Kafedra, 2014. [in Russian].