

3. Rudzky K., Gomulka P., Hoang A.T. (2022). Optimization Model to Manage Ship Fuel Consumption and Navigation Time, 29(3):141-153, DOI: 10.2478/pomr-2022-0034. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/364936493_Optimization_model_to_manage_ship_fuel_consumption_and_navigation_time
4. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). (2022). Review of Maritime Transport. Retrieved from https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2022_en.pdf
5. Vorokhobin, I.I. (2019). Rozrobka teorii ta metodiv otsinky pidvyshchennia nadiinosti sudnovodinnia: monohrafiia [Development of theory and methods for assessing the improvement of navigation reliability: monograph]. Odesa: NU «OMA». [in Ukrainian]
6. Mudrov, V.M., & Kushko, V.L. (1976). Metody obrabotki izmerenii [Methods of measurement processing]. Moscow: Sovetskoe radio. [in Russian]
7. Astaikin, D.V., & Alekseichuk, B.M. (2014). Identyfikatsiia zakoniv rozpodilu navihatsiinykh pohrishnostei zmishanymy zakonamy dvokh typiv [Identification of navigation error distribution laws by mixed laws of two types]. Avtomatyzatsiia sudovykh tekhnichnykh zasobiv: nauk.-tekhn. zb. Odesa: ONMA, 20, 3-9. [in Ukrainian]
8. International Hydrographic Organization (IHO). (2023). Standards for Hydrographic Surveys (S-44). Retrieved from <https://iho.int/en/standards-and-specifications>
9. Yang Z., Qu W., Zhuo J. (2024). Optimization of Energy Consumption in Ship Propulsion Control under Severe Sea Conditions, J. Mar. Sci. Eng. 2024, 12(9), 1461;, DOI: 10.3390/jmse12091461. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/9/1461>
10. Wärtsilä. (2024). Report: Sustainable fuels for shipping by 2050 – the 3 key elements of success. Wärtsilä Insights. Retrieved from <https://www.wartsila.com/insights>

УДК 656.61.052:551.501.81

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.06

Томчаковський Г.Г., Капочкіна М.Б., Оберто Сантана Л.Е.

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ІНТЕГРАЦІЇ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ДАНИХ В ЕКНІС

Стрімкий розвиток електронної картографії та навігаційних інформаційних систем відкрив нові можливості для підвищення безпеки та ефективності морських перевезень. Однак повноцінна реалізація цього потенціалу неможлива без інтеграції в навігаційний процес даних про поточні та прогнозовані метеорологічні умови плавання. У статті проведено комплексний аналіз сучасних досліджень в області інтеграції метеорологічних даних в електронні картографічні навігаційно-інформаційні системи (ЕКНІС). Розглянуто існуючі підходи до обробки та представлення метеорологічних даних в морській навігації, виявлено їх основні обмеження. Значну увагу приділено питанням стандартизації форматів метеорологічних даних для їх ефективної інтеграції в ЕКНІС. Проаналізовано сучасні формати метеоданих, включаючи спеціалізовані бінарні формати (GRIB), текстові повідомлення (NAVTEX, SafetyNET) та перспективні розробки на базі стандартів S-57 та S-100 Міжнародної гідрографічної організації. Особливий акцент зроблено на методи інтеграції метеоданих в ЕКНІС на основі стандартів ІНО S-57 та S-52, які дозволяють забезпечити уніфіковане відображення метеорологічної інформації в контексті електронної навігаційної карти. Розглянуто ключові аспекти візуалізації метеорологічної інформації в ЕКНІС, включаючи використання спеціалізованих символів та умовних позначень, адаптованих для завдань морської навігації. Проаналізовано сучасні підходи до організації оперативного оновлення метеорологічних даних в ЕКНІС з використанням механізмів розвитку інформації на блоки (осередки) для підвищення ефективності передачі даних по обмежених

каналів зв'язку. На основі аналізу результатів тестувань різних систем інтеграції метеоданих в ЕКНІС показано суттєве зниження витрати палива та підвищення ефективності роботи екіпажу за рахунок оптимізації маршрутів плавання з урахуванням метеорологічних умов. Окреслено основні напрямки подальших досліджень, пов'язаних із розробкою спеціалізованих стандартів метеоданих для ЕКНІС та вдосконаленням методів автоматизованого урахування метеорологічних факторів при плануванні рейсів.

Ключові слова: ЕКНІС, метеорологічні дані, морська навігація, електронна картографія, безпека мореплавства, метеорологічне забезпечення, системи підтримки прийняття рішень.

Постановка проблеми. В сучасних умовах морського судноплавства забезпечення безпеки навігації нерозривно пов'язане з ефективним використанням метеорологічної інформації при плануванні і здійсненні морських переходів. Електронні картографічні навігаційно-інформаційні системи (ЕКНІС) є основним інструментом забезпечення навігаційної безпеки суден. Однак, незважаючи на стрімкий розвиток технологій електронної картографії та навігаційних систем, актуальною залишається проблема обмеженої функціональності існуючих реалізацій ЕКНІС в частині обробки і представлення метеорологічної інформації.

Роль метеорологічних факторів при плануванні морських маршрутів протяжністю більше 1500 морських миль розглядається в багатьох дослідженнях. При цьому, що сучасні технічні рішення в області метеорологічної навігації часто обмежуються простим накладенням метеоданих на електронні карти або базовими розрахунками втрати швидкості судна.

Проблема ускладнюється недостатньою інтегрованістю існуючих форматів представлення метеорологічної інформації, включаючи широко використовуваний формат GRIB, в структуру даних ЕКНІС. Це створює технічні складності при оновленні метеорологічної інформації і ускладнює її ефективне використання судноводіями в процесі прийняття рішень.

Міжнародні організації ІМО, ІНО і WMO приділяють значну увагу питанням інтеграції метеорологічних даних в навігаційні системи, підкреслюючи її критичне значення для забезпечення безпеки судноплавства. Особливу актуальність дана проблематика набуває в контексті розвитку концепції e-Navigation, що передбачає комплексну інтеграцію всіх навігаційних даних для підвищення безпеки та ефективності морського судноплавства.

Незважаючи на активні дослідження в даній області, залишається ряд невирішених питань, пов'язаних з відсутністю єдиних стандартів представлення метеоданих в ЕКНІС, недостатньою інтеграцією систем прогнозування небезпечних метеорологічних явищ, а також обмеженістю комплексних рішень для автоматизації процесу прийняття рішень на основі метеоданих. Все це обумовлює актуальність подальших досліджень, спрямованих на розробку ефективних методів інтеграції метеорологічної інформації в системи електронної картографії та навігації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика інтеграції метеорологічних даних в навігаційні системи є предметом активних досліджень в останні роки. Значний внесок у розвиток даного напрямку внесли роботи, присвячені розробці комплексних підходів до інтеграції метеоданих з алгоритмами розрахунку морехідних якостей судна. В рамках даних досліджень продемонстровано потенціал використання ансамблевих методів прогнозування для оцінки можливої економії палива при використанні погодної маршрутизації [1].

Значущим етапом у розвитку методології інтеграції метеоданих в ЕКНІС стала розробка структурованої системи кодування і відображення метеорологічної інформації на основі стандартів ІНО S-57 і S-52. Запропонована в рамках даного дослідження архітектура системи дозволяє ефективно інтегрувати різні джерела метеоданих в ЕКНІС, забезпечуючи їх уніфіковане представлення і відображення [2].

Подальший розвиток концепції інтеграції метеоданих в ЕКНІС пов'язаний з розробкою нових стандартів представлення метеорологічної інформації. Зокрема, розглядається створення стандарту S-412 для відображення метеоданих у вигляді інформаційного шару в ЕКНІС [3]. Даний підхід спрямований на стандартизацію форматів даних і поліпшення взаємодії між різними системами, що дозволяє підвищити ефективність використання метеорологічної інформації в навігаційному процесі.

При інтеграції метеоданих в ЕКНІС важливим аспектом є врахування всього комплексу метеорологічних параметрів, що впливають на безпеку судноплавства. Запропонована модель групування і оцінки метеорологічних факторів при плануванні маршруту, що дозволяє комплексно враховувати вплив вітру, хвилювання, течій та інших параметрів на вибір оптимального шляху проходження судна [4].

Аналізуючи дослідження в даній області, залишається ряд відкритих питань, пов'язаних з відсутністю загальноприйнятих стандартів представлення метеоданих в ЕКНІС, недостатньою проробкою механізмів оперативного оновлення метеорологічної інформації, обмеженою інтеграцією систем прогнозування небезпечних метеорологічних явищ, а також відсутністю комплексних рішень для автоматизації процесу прийняття рішень на основі метеоданих.

Метою даної роботи є аналіз сучасного стану досліджень в області методів інтеграції метеорологічних даних в ЕКНІС, виявлення ключових проблем і обмежень існуючих підходів, а також визначення перспективних напрямків розвитку даної області. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання:

1. Аналіз існуючих підходів до структурування і кодування метеорологічної інформації для її інтеграції в системи електронної картографії;
2. Розгляд методів і технологій оперативного оновлення метеоданих в ЕКНІС, включаючи обробку інформації, що надходить по каналах NAVTEX і SafetyNET, інтеграцію даних від систем GMDSS і оновлення прогностичної метеорологічної інформації;
3. Дослідження методів візуалізації метеорологічних даних в ЕКНІС, що забезпечують наочне уявлення поточної і прогнозованої метеообстановки і підтримку прийняття рішень судноводіями;
4. Аналіз результатів тестування систем інтеграції метеоданих в ЕКНІС, оцінка їх впливу на ефективність судноводіння і безпеку мореплавства.

Виклад основного матеріалу. Однією з основних проблем, що стоять на шляху ефективної інтеграції метеорологічних даних в системи електронної картографії, є відсутність єдиних стандартів представлення метеоінформації. Широке різноманіття використовуваних форматів, включаючи текстові повідомлення, растрові карти, спеціалізовані бінарні формати (GRIB) і ін., створює значні складності при розробці універсальних методів інтеграції метеоданих в ЕКНІС.

Рішення даної проблеми бачиться в створенні уніфікованої структури даних на основі розширення існуючих стандартів електронної картографії, таких як ІНО S-57. Подібний підхід дозволяє забезпечити сумісність метеорологічної інформації з форматами ЕКНІС при збереженні необхідної гнучкості для подання різних типів метеоданих – від окремих вимірювань до результатів чисельного моделювання.

Ключовим компонентом розширеної структури даних є механізми кодування різноманітної метеорологічної інформації відповідно до єдиної схеми, заснованої на використанні об'єктно-орієнтованого підходу і апарату XML. Це дозволяє описувати як окремі метеорологічні параметри (швидкість і напрямок вітру, висота хвиль, атмосферний тиск і т.д.), так і комплексні метеорологічні об'єкти (шторми, циклони, атмосферні фронти) в термінах класів об'єктів, атрибутів і зв'язків між ними [5].

Конвертовані дані надходять в підсистему збереження і управління метеоданими, яка забезпечує їх зберігання, оновлення, вибірку за запитом користувача і передачу для відображення в модулі ЕКНІС. Візуалізація метеорологічної інформації здійснюється з використанням спеціалізованої бібліотеки умовних позначень, адаптованої для завдань морської навігації. При цьому передбачена можливість гнучкого налаштування складу відображуваних даних і параметрів їх візуалізації залежно від потреб користувача і поточного навігаційного контексту. Даний підхід дозволяє консолідувати різноманітну метеорологічну інформацію в рамках єдиної системи і забезпечує її уніфіковане представлення в середовищі ЕКНІС [2]. Це закладає фундамент для реалізації різних сценаріїв використання метеоданих в задачах навігації, включаючи оцінку поточних і прогнозованих погодних умов плавання, оптимізацію маршрутів з урахуванням метеорологічних факторів, завчасне виявлення потенційно небезпечних ситуацій тощо.

Перетворення метеорологічних даних в уніфіковані структури на основі стандарту S-57 відкриває широкі можливості для їх інтеграції в ЕКНІС з використанням різних механізмів доставки і оновлення інформації. Це можуть бути як традиційні канали зв'язку (NAVTEX, SafetyNET), так і сучасні технології передачі даних (GSM, 3G/4G, супутникові канали).

Один із способів організації оновлення метеоданих в ЕКНІС є механізм, заснований на використанні концепції осередків. Метеорологічна інформація при цьому розбивається на окремі фрагменти (осередки), кожен з яких містить дані для певної області акваторії і певного часового інтервалу. Оновлення здійснюється шляхом передачі по каналах зв'язку тільки тих осередків, які зазнали змін з моменту попереднього оновлення. Даний підхід дозволяє істотно скоротити обсяг переданої інформації і знизити навантаження на канали зв'язку в порівнянні з повною заміною всього масиву метеоданих при кожному оновленні. Крім того, механізм осередків забезпечує можливість вибіркового оновлення метеорологічної інформації для конкретних районів плавання, що представляють інтерес в даний момент часу [3].

Ефективність описаних методів кодування та оновлення метеоданих безпосередньо залежить від використовуваних технологій картографічної візуалізації. Традиційні підходи, засновані на відображенні метеорологічної інформації у вигляді окремих шарів електронної карти, не завжди забезпечують необхідний рівень наочності та інформативності для прийняття рішень судноводієм.

Більш перспективним є підхід, при якому метеорологічні дані інтегруються безпосередньо в навігаційний контекст і відображаються з урахуванням особливостей поточної навігаційної ситуації. Це дозволяє забезпечити цілісне сприйняття судноводієм всієї сукупності чинників, що впливають на безпеку плавання, і оперативно реагувати на зміни метеорологічної обстановки. Приклади реалізації подібного підходу наведені на рис. 1, де представлені фрагменти інтерфейсу ЕКНІС з інтегрованим відображенням метеорологічної інформації у вигляді даних про вітер, хвилювання і атмосферний тиск. Використання системи умовних позначень, адаптованих до вимог морської навігації, забезпечує швидку і інтуїтивно зрозумілу інтерпретацію метеоданих в контексті електронної карти.

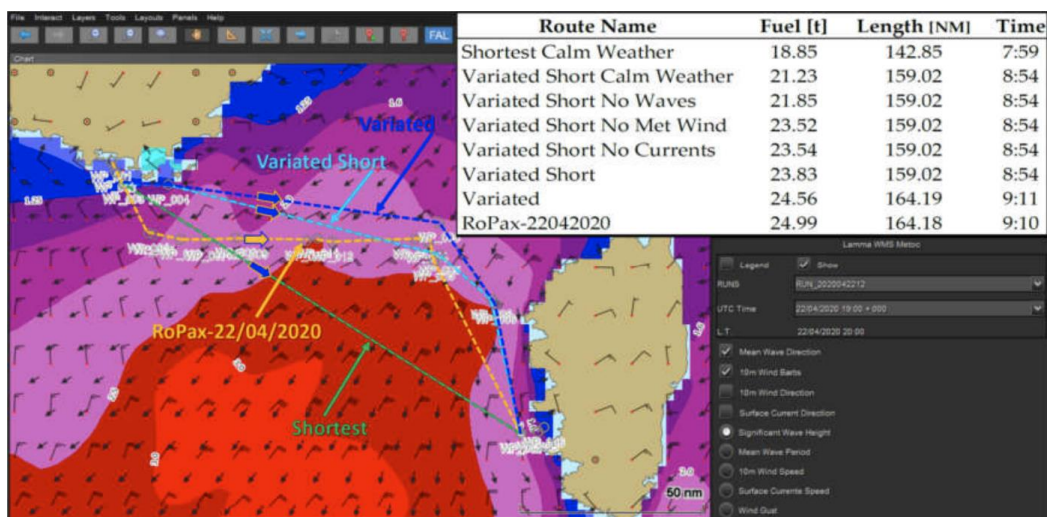


Рисунок 1 – Приклад інтерфейсу ЕКНІС з інтегрованими метеоданими [3]

Окремою проблемою, що вимагає особливої уваги при інтеграції метеоданих в ЕКНІС, є обробка інформації про небезпечні метеорологічні явища – тропічні цикли, шторми, смерчі і ін. Своєчасне доведення до судноводія попереджень про такі явища та оцінка їх впливу на умови плавання має критичне значення для забезпечення безпеки судна і екіпажу. Запропоновано метод автоматизованої обробки штормових попереджень та даних про тропічні цикли з використанням алгоритмів розпізнавання і класифікації метеорологічних об'єктів [3]. Результати

аналізу динамічно інтегруються в навігаційну обстановку у вигляді інформаційних шарів з деталізацією небезпечних зон і ступеня їх впливу на маршрут судна (рис. 2).

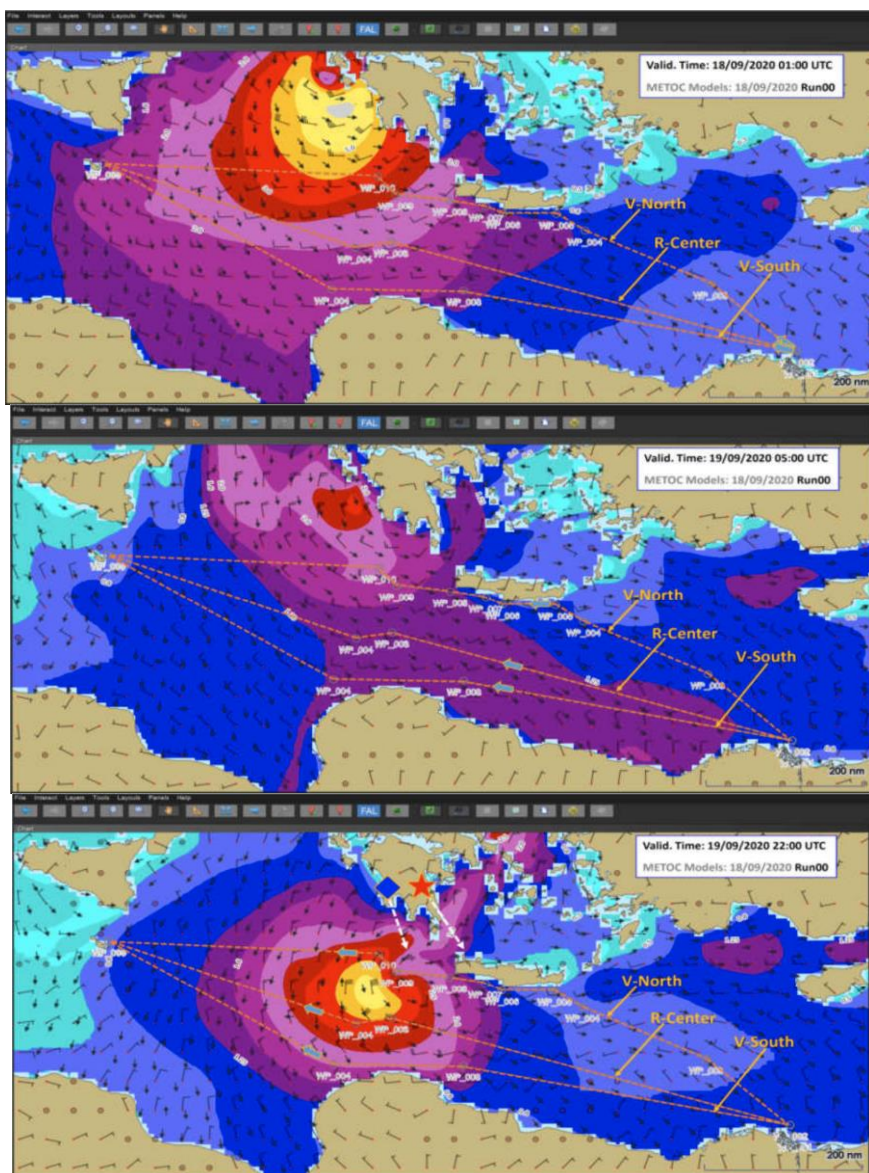


Рисунок 2 – Візуалізація прогнозу розвитку метеоумов на маршруті судна [3]

Описаний підхід дозволяє судноводію оперативно оцінювати ризики, пов'язані з небезпечними метеорологічними явищами, і коригувати маршрут з урахуванням прогнозованого розвитку метеорологічної ситуації. При цьому забезпечується автоматичне визначення безпечних зон і секторів маневрування судна відносно центру шторму або циклону.

Тестування розглянутих методів і технологій інтеграції метеоданих в ЕКНІС, проведене в рамках розглянутого ряду досліджень, підтвердило їх високу ефективність в реальних умовах експлуатації. Згідно з результатами досліджень, використання систем інтеграції метеоданих дозволяє скоротити час, необхідний судноводію для оцінки метеорологічних умов плавання, в середньому на 40% у порівнянні з традиційними методами. При цьому забезпечується підвищення точності прогнозування потенційно небезпечних ситуацій на 35%. Окрему увагу в дослідженнях приділено оцінці економічного ефекту від впровадження систем інтеграції метеоданих, обумовленого оптимізацією маршрутів плавання з урахуванням метеорологічних умов. Наведено дані про зниження витрати палива на 5-10% за рахунок більш раціонального планування рейсів на основі актуальної метеорологічної інформації в ЕКНІС [1].

Результати тестування переконливо свідчать про значні переваги комплексної інтеграції метеорологічних даних в системи електронної картографії та навігації. Використання розглянутих методів і технологій дозволяє підвищити ситуаційну обізнаність судноводіїв, забезпечити підтримку прийняття рішень в складних метеоумовах і в кінцевому підсумку підвищити безпеку та ефективність морських перевезень.

Висновки. Проведений аналіз сучасного стану досліджень в області інтеграції метеорологічних даних в ЕКНІС показав, що дана проблематика є актуальним і динамічно розвиваючимся напрямком на стику інформаційних технологій, морської метеорології та навігації.

Ключовими факторами, що визначають ефективність інтеграції метеоданих, є використання уніфікованих форматів представлення метеорологічної інформації на основі стандартів електронної картографії, застосування ефективних механізмів оновлення даних, а також реалізація методів візуалізації, що забезпечують подання метеообстановки в контексті навігаційної ситуації. Результати тестування систем інтеграції метеоданих в ЕКНІС підтверджують їх високу ефективність з точки зору підвищення інформаційної підтримки судноводіїв і оптимізації процесу прийняття рішень в складних метеоумовах плавання. Комплексний облік метеорологічних факторів при плануванні рейсів дозволяє знизити витрату палива і підвищити економічну ефективність морських перевезень.

Разом з тим, залишається ряд напрямків, що вимагають подальшого опрацювання і розвитку. До них відносяться створення спеціалізованих стандартів метеоданих в рамках перспективних специфікацій ІНО S-100, вдосконалення алгоритмів прогнозування небезпечних метеоявищ, а також розробка методів автоматизованої оцінки впливу метеоумов на безпеку судноплавства. Вирішення зазначених завдань дозволить вивести метеорологічне забезпечення морської навігації на якісно новий рівень і забезпечити створення інформаційного середовища, що відповідає вимогам безпеки та ефективності судноплавства в умовах інтенсивного розвитку цифрових технологій.

Подальші дослідження в даній області доцільно зосередити на практичній реалізації перспективних концепцій і технологій інтеграції метеоданих в рамках пілотних проєктів е-Навігації. Особливу увагу слід приділити відпрацюванню взаємодії систем метеорологічного забезпечення з іншими компонентами інформаційної інфраструктури е-Навігації, включаючи системи обміну навігаційною інформацією, системи моніторингу морського трафіку, а також берегові центри управління рухом суден. Важливим напрямком подальших досліджень є розширення функціональних можливостей систем метеорологічного забезпечення навігації за рахунок інтеграції даних з нових джерел інформації, таких як супутникові системи дистанційного зондування, берегові мережі метеорологічних радарів і ін. Використання подібних даних в поєднанні з сучасними методами чисельного прогнозування дозволить підвищити точність і деталізацію метеорологічної інформації, доступної судноводію в реальному часі.

Перспективним напрямком розвитку є інтеграція систем метеорологічного забезпечення навігації з системами автоматизації судноводіння і підтримки прийняття рішень на основі технологій штучного інтелекту. Це відкриває можливості для створення "інтелектуальних" систем метеорологічної навігації, здатних автоматично виробляти рекомендації щодо вибору оптимального маршруту і режиму руху судна в залежності від прогнозованих метеоумов плавання.

Отже, інтеграція метеорологічної інформації в системи електронної картографії та навігації є важливим і перспективним напрямком розвитку сучасних технологій судноплавства. Використання розглянутих в даній статті підходів і методів дозволяє істотно підвищити інформаційну підтримку судноводіїв, забезпечити прийняття ефективних рішень щодо маршрутизації суден в складних метеоумовах і в кінцевому рахунку підвищити безпеку та ефективність морських перевезень.

REFERENCES

1. Orlandi, A., Pasi, F., Capecchi, V., Coraddu, A., & Villa, D. (2015). Powering and seakeeping forecasting for energy efficiency: Assessment of the fuel savings potential for weather routing by in-service data and ensemble prediction techniques. *Journal of Marine Science and Technology*, 31, 89-103.
2. Chang, S. J. (2001). Design and Preliminary Test on the Integration of Weather Data in ECDIS for

- Marine Navigation. Journal of Marine Science and Technology, 9(1), 22-24.
3. Orlandi, A., Cappugi, A., Mari, R., Pasi, F., & Ortolani, A. (2021). Meteorological Navigation by Integrating Metocean Forecast Data and Ship Performance Models into an ECDIS-like e-Navigation Prototype Interface. Journal of Marine Science and Engineering, 9(5), 502.
 4. Vidan, P., Kasum, J., & Zujic, M. (2010). Meteorological Navigation and ECDIS. Promet – Traffic & Transportation, 22(5), 373-378.
 5. International Hydrographic Organization (2000). S-57 Transfer Standard for Digital Hydrographic Data, Edition 3.1. Monaco: IHO.
 6. International Maritime Organization (1995). Resolution A.817(19) on Performance Standards for ECDIS. London: IMO.
 7. International Hydrographic Organization (2010). S-52 Specifications for Chart Content and Display Aspects of ECDIS, Edition 6.0. Monaco: IHO.
 8. Information technology. Specification for a data descriptive file for information interchange (ISO/IEC 8211:1994) available at URL: <https://webstore.ansi.org/standards/iso/isoiec82111994>
 9. International Hydrographic Organization. P-1 The International Hydrographic Review (IHR) Vol. 29, No 1, May 2023. URL: https://ihr.iho.int/wp-content/uploads/2023/04/IHR_29-1.pdf.
 10. International Maritime Organisation (IMO). Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions, MSC 1, Circ. 1228, January 2007.

Tomchakovsky G.G., Kapochkina M.B., Oberto Santana L.E.

ANALYSIS OF METHODS FOR INTEGRATING METEOROLOGICAL DATA INTO ECDIS

The dynamic development of electronic cartography and navigation information systems has opened up new opportunities to improve the safety and efficiency of maritime transport. However, the full realisation of this potential is impossible without the integration of data on current and forecasted meteorological conditions into the navigation process. The article conducts a comprehensive analysis of current research in the field of integration of meteorological data into electronic charting navigation information systems (ECDIS). The existing approaches to the processing and presentation of meteorological data in maritime navigation are considered, and their main limitations are identified. Considerable attention is paid to the issues of standardisation of meteorological data formats for their effective integration into ECDIS. Modern meteorological data formats are analysed, including specialised binary formats (GRIB), text messages (NAVTEX, SafetyNET) and promising developments based on the International Hydrographic Organisation's S-57 and S-100 standards. Particular emphasis is placed on the method of integrating meteorological data into ECDIS based on IHO S-57 and S-52 standards, which allow for a unified display of meteorological information in the context of an electronic navigation chart. The key aspects of visualisation of meteorological information in ECDIS are considered, including the use of specialised symbols and conventions adapted for maritime navigation tasks. The article analyses modern approaches to the organisation of operational updating of meteorological data in ECDIS using mechanisms for dividing information into blocks (cells) to increase the efficiency of data transmission over limited communication channels. Based on the analysis of the results of testing various systems for integrating meteorological data into ECDIS, a significant reduction in fuel consumption and an increase in crew efficiency are shown by optimising navigation routes with regard to meteorological conditions. The main directions of further research related to the development of specialised meteorological data standards for ECDIS and improvement of methods for automated consideration of meteorological factors in flight planning are outlined.

Keywords: ECDIS, meteorological data, maritime navigation, electronic cartography, maritime safety, meteorological support, decision support systems.