

© Гончарук І.П., Васалатій Н.В.

## ОПЕРАТИВНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОРТОВОГО ХВИЛЮВАННЯ ТА РУХІВ ПРИШВАРТОВАНИХ СУДЕН ПІД ВПЛИВОМ ДОВГОПЕРІОДНИХ ХВИЛЬ У ПОРТАХ ЧОРНОГО МОРЯ

У статті розглянуто проблему портового хвилювання, спричиненого довгоперіодними хвилями, які становлять один із найбільш небезпечних та недостатньо досліджених гідрометеорологічних факторів ризику для морських портів. На основі аналізу світових випадків прояву інфрагравітаційних хвиль, сейш та метеоцунамі встановлено їх здатність проникати в портові акваторії, збуджувати резонансні коливання та викликати небезпечні рухи пришвартованих суден, що призводить до перевантажень швартових систем, пошкоджень інфраструктури та операційних простоїв. Показано, що порти Чорного моря є вразливими до несеїсмічних довгоперіодних хвиль, що підтверджується подією «одеського цунамі» 2014 року [1]. Проведений огляд сучасних моделей хвильового прогнозу й аналіз рухів суден демонструє відсутність інтегрованого підходу, який би об'єднував прогноз хвильового поля відкритого моря, моделювання портових осциляцій та визначення рухів пришвартованих суден відповідно до критеріїв безпеки. У роботі обґрунтовано необхідність розроблення нового обчислювально ефективного методу оперативного прогнозування, адаптованого до умов портів Чорного моря, який забезпечить підвищення рівня гідрометеорологічної безпеки портових операцій.

**Ключові слова:** довгоперіодні хвилі, інфрагравітаційні хвилі, сейші, метеоцунамі, портові осциляції, швартові операції, рухи пришвартованих суден, резонанс, портове хвилювання, оперативний прогноз.

**Постановка проблеми.** Портове хвилювання, спричинене довгоперіодними хвилями, є одним із ключових, але недостатньо вивчених гідрометеорологічних факторів ризику для морських портів. Такі хвилі здатні проникати в акваторії портів, збуджувати їхні власні резонансні коливання та викликати небезпечні рухи пришвартованих суден, що призводить до перевищення допустимих навантажень у швартових лініях, пошкоджень інфраструктури та значних простоїв причалів. Світовий досвід портів Ресем (Бразилія), Chimbote (Перу), Асаїутла (Сальвадор), Ngqura (ПАР) підтверджує масштаби цієї проблеми та необхідність її прогнозування.

Події на кшталт «одеського цунамі» 2014 року свідчать, що порти Чорного моря також є вразливими до несеїсмічних довгоперіодних хвиль. Попри наявні гідродинамічні моделі хвильового режиму, у регіоні відсутні інтегровані методи оперативного прогнозування, які б поєднували прогноз хвиль у відкритому морі, портові осциляції та рухи пришвартованих суден відповідно до міжнародних критеріїв безпеки.

Отже, існує науково-практична потреба у розробленні методу оперативного прогнозування портового хвилювання та рухів пришвартованих суден, адаптованого до умов портів Чорного моря. Такий метод має враховувати фізичні механізми формування довгих хвиль, їхню взаємодію з геометрією портових акваторій та забезпечувати кількісну оцінку рівня небезпеки для швартових операцій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання оперативного прогнозування портового хвилювання та рухів пришвартованих суден активно розвивається в межах кількох наукових напрямів: моделювання довгоперіодних хвиль, чисельного прогнозування портових осциляцій, аналізу рухів пришвартованих суден та створення операційних систем оцінювання ризиків. Сукупність цих досліджень формує теоретичний фундамент для розроблення ефективного методу прогнозування портового хвилювання й рухів суден [2]. Дослідження [3] зосереджене на створенні аналітичного підходу для прогнозування рухів пришвартованих суден на основі метеопрогнозу та хвильових моделей.

Автори показали, що ключовими факторами, які впливають на точність прогнозу, є значна висота хвилі та співвідношення розмірів судна; найкраще піддаються прогнозуванню вертикальні рухи і поздовжні переміщення. Хоча метод забезпечує прийнятну точність, він здебільшого орієнтований на спектральні характеристики звичайного хвилювання і не враховує специфіку інфрагравітаційних хвиль. Розвиток машинного навчання дозволив суттєво підвищити точність прогнозу рухів суден у порту. У роботі [4] запропоновано повністю керовану ML-модель, що використовує часові ряди рухів суден та хвильові параметри для прогнозування їх динаміки. Результати [5] демонструють потенціал напівнаглядних моделей, які ефективно працюють навіть із частково маркованими даними; включення інфрагравітаційної компоненти хвилювання значно збільшує точність прогнозу. Незважаючи на це, ML-моделі залишаються прив'язаними до конкретних портів і потребують великих обсягів високоякісних даних. Проблематика довгоперіодних хвиль та портових резонансів має фундаментальне значення для прогнозування швартових ризиків. У роботі [6] систематизовано механізми генерації довгих хвиль і їхню взаємодію з береговими та портовими структурами. У роботі [7] представили чисельне моделювання довгих хвиль та рухів суден у японському порту Томакомай, підтвердивши критичну роль резонансних ефектів для оцінки безпеки швартування. У дослідженні [8] застосовано хвильлет-аналіз для ідентифікації небезпечних режимів резонансу у взаємодії «портова акваторія – судно». Окремий напрям становлять системи управління ризиками швартових операцій. У дослідженні [9] автори показали, що більшість інцидентів відбувається за умов помірного хвилювання через присутність довгоперіодних хвиль та портових резонансів. Подальша робота авторів представила систему прогнозування ризиків для пришвартованих суден, яка поєднує хвильовий прогноз, моделювання рухів суден і розрахунок рівня ризику для операцій [10]. Інструмент SWAMS ALERT пропонує оперативну оцінку небезпечних навантажень у швартових канатах, інтегруючи рухи судна та гідродинамічні фактори [11]. Сучасні платформи хвильового прогнозу також роблять суттєвий внесок у безпеку портових операцій. Автори [12] представили регіональну модельну систему для прогнозу хвиль у Середземному морі з орієнтацією на потреби портової інфраструктури. У наступній роботі автори розробили операційну платформу Assu-Waves, яка забезпечує локальне уточнення хвильового режиму в портах, хоча система не охоплює рухи пришвартованих суден [13].

Загалом огляд літератури свідчить, що існує розвинена теорія довгих хвиль та портових осциляцій; доступні чисельні моделі для хвиль і рухів суден; створено низку інструментів для ризик-орієнтованого управління швартовими операціями; активно розвиваються ML-підходи для прогнозу рухів суден.

Водночас існуючі моделі переважно порт-специфічні, погано адаптуються до інших акваторій і не часто забезпечують повну інтеграцію ланцюга «довгоперіодні хвилі - портові осциляції - рухи пришвартованих суден». Це визначає актуальність розроблення узагальненого та обчислювально ефективного методу оперативного прогнозування, орієнтованого на забезпечення безпеки швартових операцій у морських портах.

**Мета дослідження** на основі аналізу механізмів формування довгоперіодних хвиль, світового досвіду їх прогнозування та оцінки вразливості портів Чорного моря обґрунтувати та сформулювати наукові засади розроблення методу оперативного прогнозування портового хвилювання та рухів пришвартованих суден, здатного підвищити рівень гідрометеорологічної безпеки портових операцій.

**Основні результати дослідження.** На основі узагальнення світових підходів до аналізу портового хвилювання та оцінювання гідрометеорологічних ризиків у морських портах визначено ключові механізми формування довгоперіодних хвиль, їхню взаємодію з портовими акваторіями та вплив на безпеку швартових операцій. Показано, що інфрагравітаційні хвилі, сейші та метеоцунамі становлять суттєву небезпеку для портів незалежно від їхнього географічного розташування, оскільки здатні проникати в акваторію через вхідні створки, збуджувати власні моди портових осциляцій та викликати резонансні процеси.

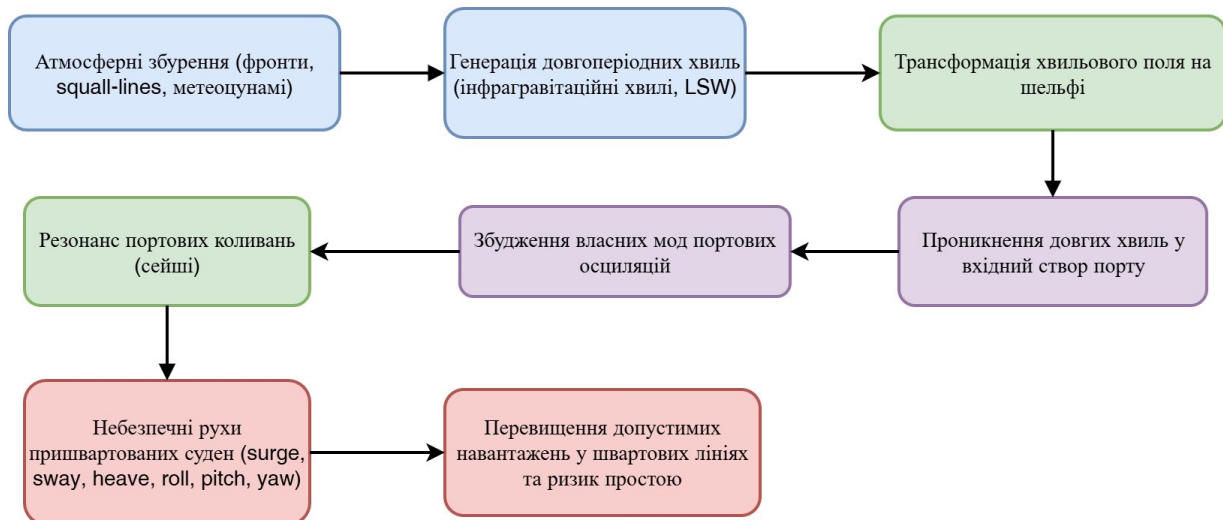


Рисунок 1. Механізм утворення довгоперіодних хвиль та їх проникнення до порту

У результаті аналізу фізичних механізмів довгоперіодних хвиль встановлено, що їхній діапазон періодів (від десятків секунд до десятків хвилин) збігається з характерними власними періодами портових басейнів. Це створює умови для резонансного зростання амплітуд коливань рівня моря всередині порту та підсилення рухів пришвартованих суден. Навіть хвилі з амплітудами 10–20 см можуть генерувати небезпечні переміщення суден у шести ступенях свободи, перевищувати нормативні межі критеріїв PIANC та спричиняти зупинку вантажних операцій.

Портові осциляції виникають унаслідок збудження довгоперіодних стоячих хвиль, відомих як сейші, що формуються в замкнених або напівзамкнених акваторіях — портах, бухтах і затоках. У класичних працях А. Rabinovich та інших дослідників наведено аналітичні моделі портових басейнів різних типів, від простих прямокутних геометрій до складних конфігурацій берегової лінії. Власні періоди таких осциляцій визначаються довжиною, глибиною й формою акваторії, та коли зовнішні збурення — довгоперіодні хвилі або різкі зміни атмосферного тиску — мають спектральні компоненти, близькі до цих власних частот, відбувається резонанс. Це призводить до істотного зростання амплітуд рівня моря всередині порту, особливо коли його характерні періоди знаходяться в діапазоні 30 секунд – 10 хвилин, властивому інфрагравітаційним хвилям та метеоцунамі.

Інфрагравітаційні хвилі (IG), що є важливою складовою довгоперіодних коливань, формуються внаслідок модуляції груп короткоперіодних хвиль, трансформації хвильового режиму на шельфі, нелінійних хвильових взаємодій та локальних резонансних явищ у прибережній зоні. Через значні довжини хвиль інфрагравітаційні коливання слабо затухають у процесі поширення, що дозволяє їм легко проникати через вхідні створки порту та збуджувати стоячі хвилі, подібні до сейш. На похилих берегах IG-хвилі здатні істотно змінювати локальний рівень моря, а в умовах портової інфраструктури — провокувати небезпечні рухи пришвартованих суден, включаючи surge, sway та вертикальні переміщення.

Метеоцунамі, ще одна форма довгоперіодних хвиль, генерується атмосферними збуреннями, такими як швидкорухомі фронти, squall-lines і мезомасштабні конвективні системи, що створюють хвильові пакети цунамі-подібної тривалості. На відміну від тектонічних цунамі, їхнє походження пов'язане з атмосферними процесами, проте гідродинамічна дія може бути подібною. Дослідження засвідчують, що такі події здатні викликати значні коливання рівня моря навіть у регіонах із низькою сейсмічністю, як-от Чорне чи Адріатичне моря. Характерним прикладом є «одеське цунамі» 27 червня 2014 року, коли атмосферне збурення спричинило хвилі з амплітудами десятків сантиметрів, зафіксованих на кількох mareograph-станціях. Подібні явища мають важливе значення для портової інфраструктури, адже здатні генерувати резонансні коливання в басейні порту та

небезпечні рухи пришвартованих суден, що істотно підвищує ризик аварійності та операційних втрат.

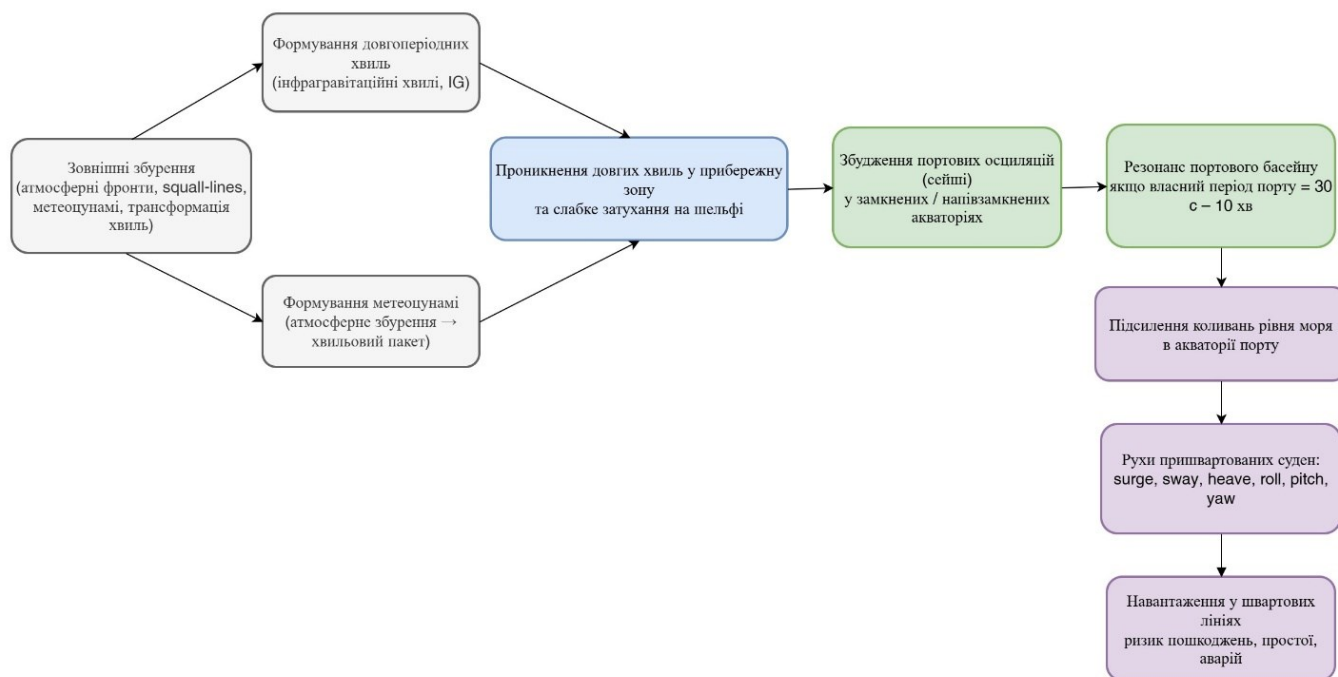


Рисунок 2. Механізми формування портових осциляцій

Проведений огляд світових кейсів із портів Pecém, Chimbote, Acapulco, Ngqura засвідчив, що проблема портового хвилювання має глобальний характер і призводить до значних економічних втрат та транспортних ризиків. У більшості випадків довгоперіодні хвилі формуються за рахунок трансформації океанічного хвилювання, атмосферних збурень або локальних резонансних явищ. У ряді портів (зокрема Ngqura та Punta Langosteira) вже створено інтегровані інструменти прогнозування, які поєднують моделі хвильового режиму з моделями рухів пришвартованих суден. Ці рішення демонструють принципову можливість переходу від гідродинамічного аналізу до операційних систем підтримки рішень.

Аналіз матеріалів свідчить, що порти Чорного моря демонструють підвищену вразливість до несеїсмічних довгоперіодних хвиль, включаючи інфрагравітаційні хвилі, сейші та метеоцунамі. На відміну від багатьох океанічних узбереж, ця вразливість є менш очевидною через відносно низьку загальну енергію хвилювання, однак геометрія портових акваторій, глибини на підходах та резонансні властивості басейну Чорного моря створюють умови для розвитку небезпечних коливань рівня навіть за помірних зовнішніх факторів.

Ключовим доказом є подія «одеського цунамі» 27 червня 2014 року, яка показала, що атмосферно зумовлені збурення можуть генерувати хвилі з амплітудами 40–60 см і періодами 15–30 хв, що відповідає власним модам низки портових акваторій регіону. Встановлено, що такі хвилі здатні викликати портові осциляції та небезпечні рухи пришвартованих суден, що суттєво підвищує ризики для швартових операцій портів Одеси, Чорноморська, Південного й інших гаваней узбережжя.

Більшість портів Чорного моря мають широкі входні створки, значні глибини на підходах та конфігурації, сприятливі для резонансу, а систематичні вимірювання IG-компоненти та спеціалізовані системи оперативного прогнозування відсутні. Це свідчить про структурний рівень гідрометеорологічної вразливості, яка може проявлятися у формі неконтрольованих коливань рівня, збільшених рухів суден, перевантажень швартових систем і потенційних простоїв причалів.

Оцінювання сучасних методів моделювання хвильових процесів показало, що спектральні моделі типу SWAN добре відтворюють умови на підходах до порту, тоді як моделі мілкої води, mild-slope та Boussinesq-моделі забезпечують можливість моделювання портових осциляцій. Проте їх застосування в оперативних задачах обмежене великою обчислювальною складністю. У спеціалізованих моделях (CGWAVE, Delft3D-Surfbeat) продемонстровано здатність точно відтворювати амплітудно-частотну структуру портових резонансів, однак ці моделі потребують адаптації для реального часу.

Проведений аналіз існуючих рішень дозволив виявити наукову прогалину: на сьогодні не існує універсального методу, який би у єдиній інтегрованій схемі пов'язував прогноз хвильового поля відкритого моря, портові осциляції та прогноз рухів пришвартованих суден із можливістю оперативного застосування в портах Чорного моря. Більшість наявних систем створені для окремих портів та не враховують специфіку замкнених морів з індивідуальним спектром довгоперіодних хвиль.

**Висновки.** Проведений аналіз підтвердив, що довгоперіодні хвилі — інфрагравітаційні хвилі, сейші та метеоцунамі — є суттєвим джерелом гідрометеорологічних ризиків для морських портів, оскільки здатні проникати в акваторії, збуджувати власні резонансні моди портових басейнів та викликати небезпечні рухи пришвартованих суден. Світова практика демонструє, що інтегровані системи прогнозування, які поєднують хвильовий прогноз, моделювання портових осциляцій та оцінювання швартових рухів суден, дозволяють ефективно зменшувати ризики та оптимізувати роботу портів. У портах Чорного моря, попри наявність окремих моделей хвильового поля, все ще відсутній комплексний підхід, який би пов'язував довгоперіодні хвилі, портові резонанси та динаміку пришвартованих суден в єдину операційну систему, здатну працювати в реальному часі. Це підтверджує актуальність розроблення адаптованого методу оперативного прогнозування, спрямованого на підвищення гідрометеорологічної безпеки портових операцій.

Майбутні напрями реалізації запропонованого методу передбачають декілька взаємопов'язаних етапів. По-перше, необхідною є розробка регіоналізованої моделі хвильового поля Чорного моря з можливістю виділення і точного відтворення інфрагравітаційної компоненти, яка відіграє ключову роль у формуванні портових осциляцій. По-друге, потрібна побудова високороздільних чисельних моделей портових басейнів для визначення їхніх власних частот та чутливості до зовнішніх збурень у широкому діапазоні періодів. По-третє, слід інтегрувати моделі рухів пришвартованих суден, що враховують нелінійність швартових систем і критерії безпеки PIANC, у єдину схему прогнозування. Важливим напрямом є також створення модулю автоматизованої оцінки ризику, який на основі синтезу результатів моделювання надаватиме диспетчерським службам порту оперативні рішення щодо можливості або обмеження швартових операцій. Подальша робота може включати використання методів машинного навчання для уточнення прогнозів, побудову системи реального моніторингу довгоперіодних хвиль та впровадження хмарної платформи для оперативної взаємодії між моделями.

Реалізація цих напрямів дозволить сформувати обчислювально ефективний та технологічно адаптивний інструмент прогнозування портового хвилювання і рухів пришвартованих суден, що забезпечить підвищення рівня гідрометеорологічної безпеки портів Чорного моря та сприятиме зменшенню операційних ризиків у швартових процесах.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Rabinovich, A. B. (2017). Seiches and harbor oscillations. In WORLD SCIENTIFIC eBooks (pp. 243–286). [https://doi.org/10.1142/9789813204027\\_0011](https://doi.org/10.1142/9789813204027_0011)
2. Sande, J., Figuero, A., Tarrío-Saavedra, J., Peña, E., Alvarelllos, A., & Rabuñal, J. R. (2019). Application of an Analytic Methodology to Estimate the Movements of Moored Vessels Based on Forecast Data. *Water*, 11(9), 1841. <https://doi.org/10.3390/w11091841>
3. Troch, C., Terblanche, L., & Rossouw, M. (2023). MOORED SHIP MOTION FORECAST TOOL FOR THE PORT OF NGQURA. *Coastal Engineering Proceedings*, 37, 67. <https://doi.org/10.9753/icce.v37.structures.67>
4. Romano-Moreno, E., Tomás, A., Diaz-Hernandez, G., Lara, J. L., Molina, R., & García-Valdecasas, J. (2022). A Semi-Supervised Machine Learning model to forecast movements of moored vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(8), 1125. <https://doi.org/10.3390/jmse10081125>
5. Pinheiro, L. V., Fortes, C. J. E. M., & Santos, J. A. (2018). Risk Analysis and Management of Moored Ships in Ports. Volume 3: Structures, Safety, and Reliability. <https://doi.org/10.1115/omae2018-78396>
6. Lee, S., Sasa, K., Aoki, S., Yamamoto, K., & Chen, C. (2021). New evaluation of ship mooring with friction effects on mooring rope and cost-benefit estimation to improve port safety. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 13, 306–320. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2021.04.002>
7. Pinheiro, L., Fortes, C., Reis, M. T., Santos, J., & Soares, C. G. (2020). RISK FORECAST SYSTEM FOR MOORED SHIPS. *Coastal Engineering Proceedings*, 36v, 37. <https://doi.org/10.9753/icce.v36v.management.37>
8. Makris, C., Papadimitriou, A., Baltikas, V., Spiliopoulos, G., Kontos, Y., Metallinos, A., Androulidakis, Y., Chondros, M., Klonaris, G., Malliouri, D., Nagkoulis, N., Zissis, D., Tsoukala, V., Karambas, T., & Memos, C. (2024). Validation and application of the Accu-Waves Operational Platform for wave forecasts at ports. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(2), 220. <https://doi.org/10.3390/jmse12020220>
9. Makris, C., Androulidakis, Y., Karambas, T., Papadimitriou, A., Metallinos, A., Kontos, Y., Baltikas, V., Chondros, M., Krestenitis, Y., Tsoukala, V., & Memos, C. (2020). Integrated modelling of sea-state forecasts for safe navigation and operational management in ports: Application in the Mediterranean Sea. *Applied Mathematical Modelling*, 89, 1206–1234. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.08.015>
10. Van Dongeren, A., De Jong, M., Van Der Lem, C., Van Deyzen, A., & Bieman, J. D. (2016). Review of Long Wave Dynamics over Reefs and into Ports with Implication for Port Operations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(1), 12. <https://doi.org/10.3390/jmse4010012>
11. Costas, R., Figuero, A., Peña, E., Sande, J., & Rosa-Santos, P. (2022). Integrated approach to assess resonance between basin eigenmodes and moored ship motions with wavelet transform analysis and proposal of operational thresholds. *Ocean Engineering*, 247, 110678. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110678>
12. Alvarelllos, A., Figuero, A., Carro, H., Costas, R., Sande, J., Guerra, A., Peña, E., & Rabuñal, J. (2021). Machine Learning based moored ship movement Prediction. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8), 800. <https://doi.org/10.3390/jmse9080800>
13. Van Der Molen, W., Monárdez, P., & Van Dongeren, A. (2006). Numerical simulation of Long-Period waves and ship motions in Tomakomai Port, Japan. *Coastal Engineering Journal*, 48(1), 59–79. <https://doi.org/10.1142/s0578563406001301>

## REFERENCES

1. Rabinovich, A. B. (2017). Seiches and harbor oscillations. In WORLD SCIENTIFIC eBooks (pp. 243–286). [https://doi.org/10.1142/9789813204027\\_0011](https://doi.org/10.1142/9789813204027_0011)
2. Sande, J., Figuero, A., Tarrío-Saavedra, J., Peña, E., Alvarelllos, A., & Rabuñal, J. R. (2019). Application of an Analytic Methodology to Estimate the Movements of Moored Vessels Based on Forecast Data. *Water*, 11(9), 1841. <https://doi.org/10.3390/w11091841>
3. Troch, C., Terblanche, L., & Rossouw, M. (2023). MOORED SHIP MOTION FORECAST TOOL FOR THE PORT OF NGQURA. *Coastal Engineering Proceedings*, 37, 67. <https://doi.org/10.9753/icce.v37.structures.67>
4. Romano-Moreno, E., Tomás, A., Diaz-Hernandez, G., Lara, J. L., Molina, R., & García-Valdecasas, J. (2022). A Semi-Supervised Machine Learning model to forecast movements of moored vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(8), 1125. <https://doi.org/10.3390/jmse10081125>
5. Pinheiro, L. V., Fortes, C. J. E. M., & Santos, J. A. (2018). Risk Analysis and Management of Moored Ships in Ports. Volume 3: Structures, Safety, and Reliability. <https://doi.org/10.1115/omae2018-78396>
6. Lee, S., Sasa, K., Aoki, S., Yamamoto, K., & Chen, C. (2021). New evaluation of ship mooring with friction effects on mooring rope and cost-benefit estimation to improve port safety. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 13, 306–320. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2021.04.002>

7. Pinheiro, L., Fortes, C., Reis, M. T., Santos, J., & Soares, C. G. (2020). RISK FORECAST SYSTEM FOR MOORED SHIPS. Coastal Engineering Proceedings, 36v, 37. <https://doi.org/10.9753/icce.v36v.management.37>
8. Makris, C., Papadimitriou, A., Baltikas, V., Spiliopoulos, G., Kontos, Y., Metallinos, A., Androulidakis, Y., Chondros, M., Klonaris, G., Malliouri, D., Nagkoulis, N., Zissis, D., Tsoukala, V., Karambas, T., & Memos, C. (2024). Validation and application of the Accu-Waves Operational Platform for wave forecasts at ports. Journal of Marine Science and Engineering, 12(2), 220. <https://doi.org/10.3390/jmse12020220>
9. Makris, C., Androulidakis, Y., Karambas, T., Papadimitriou, A., Metallinos, A., Kontos, Y., Baltikas, V., Chondros, M., Krestenitis, Y., Tsoukala, V., & Memos, C. (2020). Integrated modelling of sea-state forecasts for safe navigation and operational management in ports: Application in the Mediterranean Sea. Applied Mathematical Modelling, 89, 1206–1234. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.08.015>
10. Van Dongeren, A., De Jong, M., Van Der Lem, C., Van Deyzen, A., & Bieman, J. D. (2016). Review of Long Wave Dynamics over Reefs and into Ports with Implication for Port Operations. Journal of Marine Science and Engineering, 4(1), 12. <https://doi.org/10.3390/jmse4010012>
11. Costas, R., Figuero, A., Peña, E., Sande, J., & Rosa-Santos, P. (2022). Integrated approach to assess resonance between basin eigenmodes and moored ship motions with wavelet transform analysis and proposal of operational thresholds. Ocean Engineering, 247, 110678. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110678>
12. Alvarellos, A., Figuero, A., Carro, H., Costas, R., Sande, J., Guerra, A., Peña, E., & Rabuñal, J. (2021). Machine Learning based moored ship movement Prediction. Journal of Marine Science and Engineering, 9(8), 800. <https://doi.org/10.3390/jmse9080800>
13. Van Der Molen, W., Monárdez, P., & Van Dongeren, A. (2006). Numerical simulation of Long-Period waves and ship motions in Tomakomai Port, Japan. Coastal Engineering Journal, 48(1), 59–79. <https://doi.org/10.1142/s0578563406001301>

**Honcharuk I.P., Vasalatiy N.V.**

## **REAL-TIME FORECASTING OF PORT WAVES AND MOVEMENTS OF MOORED VESSELS UNDER THE INFLUENCE OF LONG-PERIOD WAVES IN BLACK SEA PORTS**

*The article discusses the problem of port waves caused by long-period waves, which are one of the most dangerous and insufficiently studied hydrometeorological risk factors for seaports. Based on an analysis of global cases of infragravity waves, seiches, and meteorological tsunamis, their ability to penetrate port waters, excite resonant vibrations, and cause dangerous movements of moored vessels has been established, leading to overloading of mooring systems, damage to infrastructure, and operational downtime. It has been shown that Black Sea ports are vulnerable to non-seismic long-period waves, as confirmed by the 2014 Odessa tsunami. A review of current wave forecast models and analysis of vessel movements demonstrates the lack of an integrated approach that would combine open sea wave field forecasting, port oscillation modeling, and the determination of moored vessel movements in accordance with safety criteria. The paper substantiates the need to develop a new computationally efficient method of operational forecasting adapted to the conditions of Black Sea ports, which will ensure an increase in the level of hydrometeorological safety of port operations.*

**Keywords:** long-period waves, infragravity waves, seiches, meteorological tsunamis, port oscillations, mooring operations, movements of moored vessels, resonance, port waves, operational forecasting.

Стаття прийнята 01.10.2025