

УДК 551.513.3:551.465(262.54):656.61
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/42>

Томчаковський Г.Г.

<https://orcid.org/0000-0002-9799-4368>
Одеський національний морський університет

Кучеренко Н.В.

<https://orcid.org/0009-0009-9461-1411>
Національний університет «Одеська морська академія»

Капочкіна М.Б.

<https://orcid.org/0000-0002-9770-3284>
Одеський національний морський університет

МІНЛИВІСТЬ ЛІТНЬОГО МУСОНУ В АРАВІЙСЬКОМУ МОРІ

У роботі проаналізовано особливості внутрішньосезонної мінливості поверхневого хвилювання в Аравійському морі під час літнього мусону з позицій забезпечення безпеки мореплавства та ефективності морського транспорту. На основі даних супутникових альтиметричних спостережень за 2010–2019 роки досліджено статистичні та спектральні характеристики швидкості вітру і висоти хвиль, зокрема внесок циклічних складових. Особливу увагу приділено аналізу коротко- та середньоперіодних коливань, що формують внутрішньосезонну структуру хвильового поля та визначають змінність морських умов в межах одного мусонного періоду. Показано, що максимум штормової активності може зміщуватися з серпня на червень, що істотно ускладнює планування навігації в Аравійському морі. Таке зміщення пікових значень хвильової активності має важливі наслідки для організації морських перевезень, оскільки традиційні уявлення про сезонну динаміку можуть не відповідати фактичним умовам конкретного року. Встановлено, що на різних етапах розвитку літнього мусону процес формування хвильового режиму під впливом геофізичних факторів може розподілятися на першу стадію (до дати сонцестояння), коли причина випереджає наслідок, і другу фазу, після зазначеної дати, коли хвильові умови формуються в режимі самопідтримання. Така двофазна структура розвитку хвильового процесу дозволяє більш точно інтерпретувати механізми взаємодії атмосферних і океанічних факторів та уточнює уявлення про динаміку мусонної циркуляції. Додатково показано, що варіабельність хвильових характеристик має складний спектральний склад, що обумовлює необхідність використання комплексних підходів до аналізу та прогнозування. Отримані результати підкреслюють актуальність дослідження внутрішньосезонної мінливості літнього мусону в Аравійському морі і врахування несприятливих погодних умов для оптимізації морської логістики та зменшення ризиків для судноплавства. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих залежностей для підвищення точності прогнозування хвильових умов, планування маршрутів суден та мінімізації впливу небезпечних гідрометеорологічних явищ на функціонування морського транспорту.

Ключові слова: літній мусон, Аравійське море, внутрішньосезонна мінливість, поверхнєве хвилювання, штормова активність, супутникова альтиметрія, морська логістика, морська навігація, безпека судноплавства, геофізичні фактори.

Постановка проблеми. Аравійське море є одним із ключових вузлів світового морського транспорту, у межах якого зосереджені інтенсивні судноплавні маршрути між Європою, Близьким Сходом та Південною Азією. Водночас саме в цьому регіоні щорічно формується літній Індокоріанський мусон, що характеризується сильними вітрами та небезпечним хвилюванням,

які істотно ускладнюють умови безпеки мореплавства.

Як показано в роботах Webster P. J., Gadgil S., Krishnamurti T. N., Bhalme H. N., Meehl G. A. [1–4], класичне пояснення мусонної циркуляції базується на термічному контрасті між сушею та океаном. У межах цього підходу літній мусон розглядається як результат формування термічного мінімуму

тиску над Індостаном. Динамічний підхід Gill A. E. [5] доповнює це уявлення роллю загальної циркуляції атмосфери та планетарних хвиль. Проте аналіз фактичних спостережень свідчить, що зазначені фізичні моделі не здатні кількісно пояснити реальну інтенсивність мусонних вітрів і хвильових процесів в Аравійському морі.

У наших попередніх дослідженнях пропонується розглядати літній мусон в Аравійському морі як елемент системи океан–атмосфера, чутливий до змін швидкості обертання Землі та гравітаційного поля. Такий підхід, обґрунтований у працях Максимова І. В., Сидоренкова Н. С., Сумерова К. А., Peixoto J. P., Oort A. H. [7–9], дозволяє пояснити як регулярність сезонного розвитку мусону, так і його внутрішньосезонну та міжрічну мінливість, що має безпосереднє прикладне значення для морського транспорту.

Незважаючи на значну кількість досліджень мусонної циркуляції, проблема кількісного пояснення внутрішньосезонної мінливості літнього мусону в Аравійському морі залишається невирішеною. Зокрема, за сталого напрямку вітру в регіоні епізодично фіксуються різкі коливання його швидкості, які безпосередньо впливають на хвилювання моря та, відповідно, на навігаційні умови.

Як зазначено у «Indian monsoons under close scrutiny of scientists» [6], сучасні чисельні прогностичні моделі відтворюють лише загальні сезонні риси мусону та демонструють значні похибки при описі його внутрішньосезонної мінливості. Це істотно знижує їх практичну цінність для забезпечення безпеки мореплавства в Аравійському морі.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває дослідження внутрішньосезонної мінливості хвильового режиму з урахуванням додаткових геофізичних чинників, що дозволить підвищити точність прогнозування морських умов і зменшити ризики для судноплавства.

Це зумовлює необхідність пошуку нових підходів до пояснення механізмів внутрішньосезонної мінливості мусону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових джерел свідчить, що дослідження мусонної циркуляції умовно можна згрупувати у три основні напрями, кожен з яких пояснює окремі риси літнього мусону, але не забезпечує цілісного опису його внутрішньосезонної мінливості.

Перший напрям представлений роботами, у яких мусон розглядається як переважно термічно зумовлене явище, що формується внаслідок диференційного нагрівання суші та океану [1 – 4]. У межах

цього підходу літній мусон інтерпретується як відповідь атмосфери на формування термічного мінімуму тиску над Індостаном. Разом із тим результати спостережень показують часову неузгодженість між максимумом прогріву суші, який фіксується наприкінці квітня, та фактичним початком стійкої мусонної циркуляції в червні, а також між піками температури, опадів і швидкості вітру [6, 10]. Це свідчить про обмеженість виключно термічного пояснення мусонних процесів.

Другий напрям охоплює динамічні моделі мусонної циркуляції, що базуються на аналізі загальної циркуляції атмосфери [5, 11]. Однак у тропічних широтах, зокрема над Аравійським морем, горизонтальна складова сили Кореолісу є малою, що істотно обмежує застосування геострофічного балансу. Як показано в роботах «Indian monsoons under close scrutiny of scientists» та «The El Niño–Southern Oscillation Phenomenon» [6, 12], величини баричних градієнтів, які спостерігаються в літній період, не забезпечують кількісно узгодженого пояснення реальної інтенсивності мусонних вітрів, хвилювання Аравійського моря та пов'язаних із ними навігаційних ризиків.

Третій напрям досліджень пов'язаний із вивченням впливу геодинамічних процесів на атмосферу та океан [7 – 9, 13]. У цих роботах показано, що навіть незначні варіації швидкості обертання Землі та гравітаційного потенціалу можуть призводити до перебудови баричного поля і генеральних напрямків потоків повітря у системі океан–атмосфера. Особливу роль у цьому контексті відіграє від'ємна аномалія геоїда Індійського океану, просторові та часові характеристики якої детально розглянуті в роботах Hager V. H., Clayton R. W., Richards M. A., Schott F. A., McCreary J. P., Кучеренко Н. В., Томчаковський Г. Г., Капочкіна М. Б., Калініченко С. В. [14 – 17]. Наявність цієї аномалії створює стаціонарні умови для формування специфічної циркуляційної структури, пов'язаної з розвитком літнього мусону.

Окрему групу становлять дослідження океанічних процесів в Аравійському морі, зокрема сезонної перебудови Сомалійської течії та формування масштабного апвелінгу [6, 15]. Аналіз часової еволюції цих процесів показує, що інтенсифікація апвелінгу нерідко передреє максимальному посиленню мусонних вітрів. Це суперечить класичному уявленню про виключно атмосферне походження мусонної циркуляції та свідчить про активну роль океану у формуванні приводного вітру, термічних контрастів і, відповідно, навігаційних умов у регіоні.

Таким чином, аналіз використаних джерел показує, що наявні термічні та динамічні теорії не забезпечують цілісного пояснення внутрішньосезонної мінливості літнього мусону в Аравійському морі. Сукупність результатів, наведених у працях Кучеренко Н. В., Томчаковського Г. Г., Капочкіної М. Б., Калініченко Є. В., Максимова І. В., Сидоренкова Н. С., Сумерова К. А., Peixoto J. P., Oort A. H., Blewitt G., Lavallée D., Clarke P., Nurutdinov K. [6 – 9, 16 – 17], вказує на необхідність урахування геофізичних чинників у дослідженнях мусонної циркуляції. Це є особливо важливим для задач прогнозування небезпечних гідрометеорологічних умов і підвищення безпеки мореплавства в одному з найскладніших регіонів світового судноплавства.

У роботі авторів Кучеренко Н. В., Томчаковського Г. Г., Капочкіної М. Б., Калініченко Є. В. [16] вперше на кількісному рівні розглянуто механізм формування літньої мусонної циркуляції атмосфери над великомасштабною від'ємною аномалією сили тяжіння Індійського океану. Показано, що мусонний вітер формується над цією аномалією у перманентному режимі, а не тільки під час формування максимуму термічного градієнту між сушею та океаном, що підтверджує обмеженість класичних термічних моделей. Автори обґрунтовують, що саме регіональна аномалія гравітаційного поля визначає стаціонарність циркуляції в Аравійському морі, а мусонний вітер є реакцією атмосфери на порушення рівноваги між гравітаційними та інерційними силами в системі океан–атмосфера.

Подальший розвиток цього підходу наведено в роботі [17], де показано, що мінливість інтенсивності мусонного вітру не може бути пояснена виключно мінливістю баричного поля. На основі аналізу часових змін швидкості обертання Землі встановлено, що навіть малі флуктуації кутової швидкості обертання Землі (КШОЗ) призводять до зміни інерційного стану водної оболонки Індійського океану, що, у свою чергу, викликає перебудову приводного вітру. Отримані результати дозволяють пояснити внутрішньосезонні коливання швидкості мусонного вітру за відсутності істотних змін термічних або баричних полів, що має принципове значення для прогнозування небезпечних умов мореплавства.

У роботі Blewitt G., Lavallée D., Clarke P., Nurutdinov K. [18] зроблено важливе наукове відкриття річної моди геодинамічних процесів глобального масштабу з екстремумами у березні і вересні. Таким чином, результати багатьох дослі-

джень свідчать про те, що мусонні процеси слід розглядати як прояв планетарної взаємодії обертання Землі, гравітаційного поля та океанічної циркуляції, що істотно розширює уявлення про причини мінливості мусонного вітру та їх вплив на безпеку мореплавства.

Таким чином, існуючі підходи не забезпечують пояснення внутрішньосезонної мінливості хвильового режиму в Аравійському морі з урахуванням геофізичних чинників, що обумовлює необхідність проведення додаткових досліджень у цьому напрямку.

Постановка завдання. *Метою статті є дослідження внутрішньосезонної мінливості хвильового режиму в Аравійському морі під час літнього мусону з урахуванням впливу геодинамічних факторів.*

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- проаналізувати часові ряди швидкості вітру та висоти хвиль;
- дослідити спектральні характеристики мінливості;
- оцінити зв'язок хвильових процесів із варіаціями КШОЗ.

Для розв'язання завдань факторного аналізу використано дані проєктів AVISO+ [19] (просторово-часові зміни поверхні океану, поверхневого хвилювання та приводного вітру в Аравійському морі), а також матеріали сайту «International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS)» <https://hpiers.obspm.fr> [20] (результати вимірювань кутової швидкості обертання Землі). Були враховані результати досліджень Кучеренко Н. В., Томчаковського Г. Г., Капочкіної М. Б., Калініченко Є. В., Колесника А. В., Долі В. Д. [16, 17, 21, 22], що підтверджують вплив на мусонну циркуляцію атмосфери над Аравійським морем геодинамічних процесів. Це узгоджується з висновками дослідження Бороздич Э. В. фундаментального рівня [23] відзначеного у дипломі № 273 за наукове відкриття.

У наших попередніх дослідженнях був проведений аналіз міжрічної мінливості літнього Індійського океанського мусону у період 2002 – 2017 років і було встановлено, що вона не може бути адекватно пояснена також глобальними кліматичними індексами ENSO та регіональними IOD.

Виклад основного матеріалу. За даними ГІС AVISO+ [19] отримано первинні дані мінливості швидкості вітру та висоти хвиль у Аравійському морі в період літнього мусону (червень – серпень) у 2014 – 2019 роках.

Враховуючи результати дослідження глобальних геодинамічних процесів, зокрема зональних припливів у твердому тілі Землі, що пов'язані з двотижневою циклічністю КШОЗ і формують двотижневий цикл зміни параметру J_2 , який кількісно визначає «сплюсненість» Землі [24, 25], для часового періоду 2010-2019 рр. були розраховані спектральні характеристики гармонік 14 та 28 діб часових рядів висот максимальних поверхневих хвиль у Аравійському морі та кутової швидкості обертання Землі. У таблиці 1 наведені значення амплітудних спектрів часового ряду висот максимальних поверхневих хвиль [19].

Виконані розрахунки свідчать про те, що часова мінливість поверхневого хвилювання з періодами 14 та 28 діб мала максимальні амплітуди у 2015 році. Нашими попередніми дослідженнями було виявлено, що літній мусон 2015 року співпав з процесами глобального масштабу під «умовною назвою» Ель-Ніньо. Важливо відмітити, що у третьому томі монографії у [26] було показано, що зміни у тропічній зоні у роки Ель-Ніньо гене-

руються ротаційними процесами. У зазначений період, мусон було визначено як пригнічений, але з потужною внутрішньо мусонною мінливістю. Тобто, оцінка середньої висоти вітрових хвиль була мінімальною (3,5 м), але дисперсія максимальною (0,79). Аналіз результатів апроксимації часового ряду поліноміальним рівнянням параболічного типу показав на екстремальний характер швидкості зміни прискорення процесу хвилювання протягом сезону ($A=9,2$) і третій за значенням показник асиметрії ($B=0,33$). Максимальними були і відхилення від моделі ($СКВ_{\text{моделі}}=5,6$). Це дало підставу для дослідження статистичних характеристик мусону окремо у червні та у липні – серпні. Результати статистичної обробки даних максимальної по регіону швидкості вітру у 2014 – 2019 роках показані у таблиці 2, а максимальної висоти хвиль – у таблиці 3.

Таким чином було встановлено, що максимум інтенсивності мусону, який очікувався у липні-серпні у роки, так званого, Ель Ніньо 2015 – 2016 років, відбувся у червні. У червні

Таблиця 1

Значення амплітуд спектрів часових рядів висот максимальних поверхневих хвиль у Аравійському морі (червень-серпень)

Рік	28 діб	14 діб	Рік	28 діб	14 діб
2010	0,055	0,085	2015	0,3	0,524
2011	0,044	0,089	2016	0,007	0,113
2012	0,028	0,085	2017	0,07	0,151
2013	0,033	0,208	2018	0,150	0,116
2014	0,182	0,233	2019	0,143	0,054

Джерело: власна розробка авторів на основі [19]

Таблиця 2

Статистичні характеристики для максимального вітру (км/годину) у Аравійському морі для червня та для липня-серпня

Рік	Червень (середнє)	Липень-серпень (середнє)	Червень СКВ	Липень-серпень СКВ	Червень максимум	Дати максимумів
2014	39,83	42,75	68,00	44,66	51	
2015	42,73	40,33	77,10	20,61	59	(20-23 червня)
2016	42,60	40,41	25,40	23,08	52	(23-24 червня)
2017	39,17	37,17	18,53	19,14	46	
2018	39,86	42,93	12,64	15,83	45	
2019	39,80	42,64	19,02	13,68	46	

Джерело: власна розробка авторів на основі [19]

Таблиця 3

Статистичні характеристики для максимальних висоти хвиль (м) у Аравійському морі для червня та для липня-серпня

Рік	Червень (середнє)	Липень-серпень (середнє)	Червень СКВ	Липень-серпень СКВ	Червень максимум	Дати максимумів
2014	3,6	3,75	0,95	0,80	5,5	
2015	3,8	3,3	1,20	0,60	6,2	(21-23 червня)
2016	3,8	3,7	0,79	0,65	5,3	(23-24 червня)
2017	3,6	3,4	0,60	0,57	4,8	
2018	3,6	4,1	0,57	0,66	4,7	
2019	3,5	3,9	0,73	0,56	4,6	

Джерело: власна розробка авторів на основі [19]

2015 року середня оцінка максимального вітру була 42,73 км/годину (липень – серпень – 40,33 км/годину), а середня за червень оцінка максимальної висоти хвиль була 3,8 м (липень – серпень – 3,3 м). Нами були визначені дати екстремальних значень швидкості вітру (табл. 2) і висоти хвиль (табл. 3). Звертаємо увагу і на те, що швидкості вітру та висоти хвиль у червні мають максимальне СКВ 77,1 і 1,2 відповідно. Це свідчить про наявність у червні 2015 та 2016 років днів як з потужним штормом, так і зі штилем. Виявлено, що позитивні екстремуми швидкості вітру та висоти хвиль, тобто найпотужніші шторми літнього мусону, зафіксовано у дати літнього сонцестояння, тобто у дати, коли добові та довгоперіодні припливоутворюючі сили є екстремальними і досягають $2,64 \cdot 10^5$ дин і $2,09 \cdot 10^5$ дин, відповідно [25]. На рисунку 1 показані карти за 22 червня 2015 року: швидкості вітру (максимум 59 км/годину) та висоти хвиль (максимум 6,6 м).

З метою визначення впливу річних екстремумів добових та довгоперіодних припливоутворюючих сил (22 червня) на активність літнього мусону, було обрано «фрагментарний» і екстремально потужний мусон 2010 року, що відбувся під впливом активізації геофізичних процесів. У 2010 році весняний сезон був найтеплішим за всю історію

інструментальних вимірювань, а у літній сезон глобальна кількість опадів досягла максимальних значень з 1900 року [28]. Середньорічна температура повітря в Індії була найвищою за всю історію національних спостережень з 1901 року [28]. Мусонні дощі у Пакистані (мусон Аравійського моря) наприкінці липня спричинили наймасштабнішу за всю історію спостережень повінь, а у Бангладеш (мусон Бенгальської затоки) сезон мусонних дощів виявився найсухішим з 1994 року [29, 30]. Відмінності мусонів у Аравійському морі та Бенгальській затоці розглянуті нами у роботі Колесника А. В., Доли В. Д., Кучеренко Н. В [21].

Додатковою особливістю 2010 року була нетипова різка внутрішньорічна перебудова системи ENSO: рік розпочався у фазі Ель-Ніньо, проте вже у літній період відбувся швидкий перехід до фази Ла-Нінья [31].

До аналізу були залучені дані 2010 року: часовий ряд добових значень максимальної висоти хвиль в Аравійському морі, як інтегральна характеристика погодних умов (рис. 2), і КШОЗ [20] – як один з ймовірних погодоутворюючих факторів.

На графіку проявлено асиметрію літнього мусону 2010 року: максимальна висота вітрових хвиль була згенерована штормовими умовами ще на початку червня. Максимальний рівень хвилю-

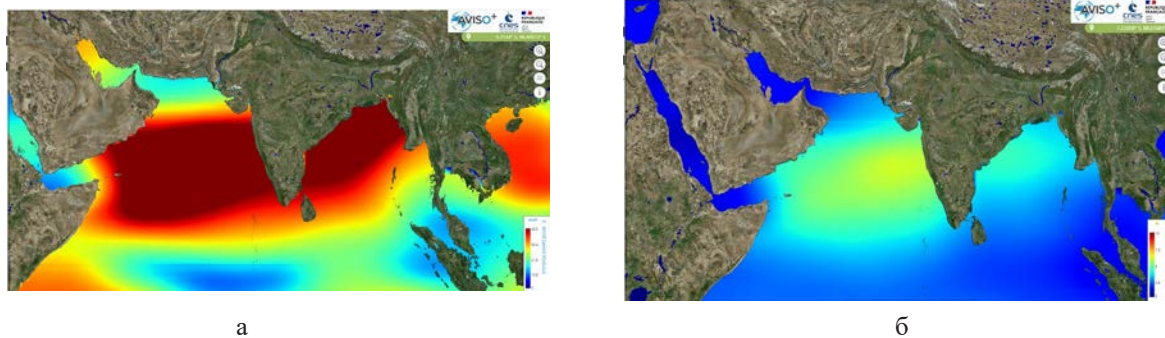


Рис. 1. Карти північної частини Індійського океану станом на 22 червня 2015 р.: а) швидкості вітру; б) висоти хвиль

Джерело: [19]

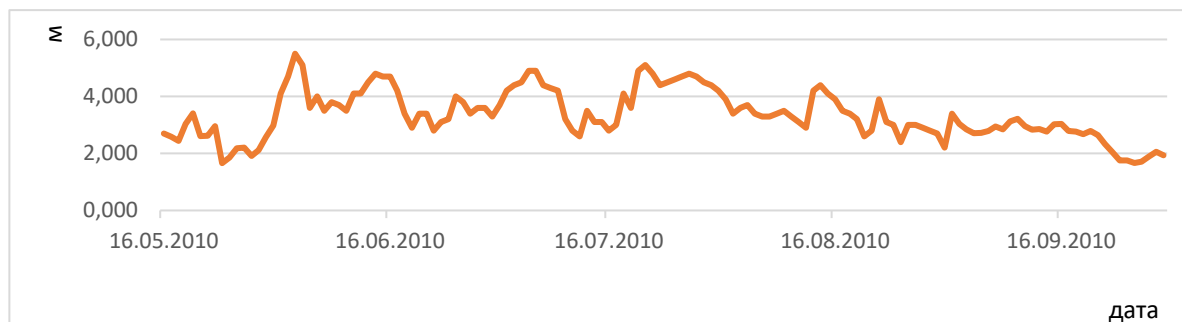


Рис. 2. Графік змін у часі максимальної висоти хвиль в Аравійському морі.

Джерело: власна розробка авторів

Результати верифікації відновленого (модельного) та фактичного часових рядів хвилювання

Рік	28 діб r	14 діб r	Σ r
2010	0.41	0.32	0.57

Джерело: власна розробка авторів

В результаті було визначено, що часовий ряд мінливості поверхневого хвилювання Аравійського моря у 2010 році у значній мірі формується під впливом процесів, що відбуваються циклічно, бо між часовим рядом мінливості поверхневого хвилювання і часовим рядом амплітуди інтегральної характеристики циклічних змін 28 та 14 діб виявлено наявність значного позитивного лінійного зв'язку (коефіцієнт кореляції $r=0,57$).

Проаналізуємо особливості часової мінливості КШОЗ під час літнього мусону 2010 року.

вання у Аравійському морі завершився у липні. За сезон літнього мусону зафіксовані 4 епізоди припинення шторму тривалістю до двох тижнів.

Шляхом вузько-смужової фільтрації, гармоніки з періодами 28 і 14 діб були вилучені з часового ряду максимальної висоти хвиль в Аравійському морі і представлені на рисунку 3.

За результатами стандартизації гармонік з періодами 28 і 14 діб часового ряду висот поверхневих хвиль була розрахована інтегральна характеристика циклічних змін висот поверхневих хвиль (рис. 4).

Графік часових змін інтегральної характеристики циклічних змін (28 та 14 діб) висот поверхневих хвиль – це, за суттю, відновлений часовий ряд хвилювання (рис. 2) за даними суми стандартизованих гармонік. Відновлений ряд було верифіковано з фактичним часовим рядом хвилювання, шляхом розрахунку коефіцієнтів кореляції (табл. 4).

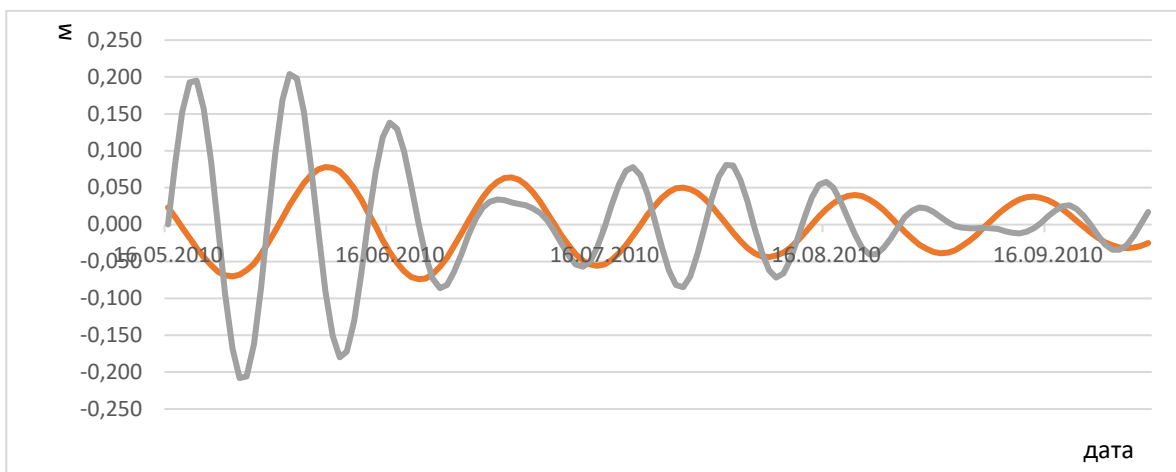


Рис. 3. Графіки гармонік з періодом 28 (червоний) і 14 діб (зелений), вилучених з часового ряду максимальних висот поверхневих хвиль

Джерело: власна розробка авторів

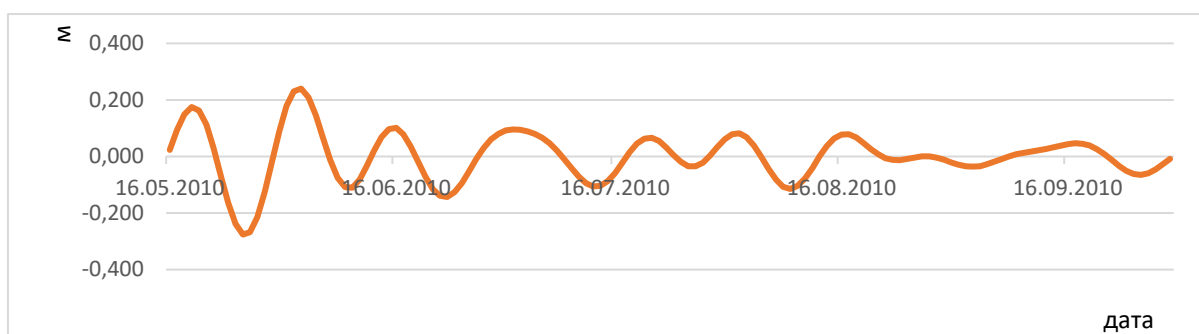


Рис. 4. Графік змін у часі амплітуди інтегральної характеристики циклічних змін 28 та 14 діб (відновлений графік циклічних висот поверхневих хвиль)

Джерело: власна розробка авторів

Результати аналізу даних, приведених на рисунках 2 і 5, свідчать про те, що усі 4 епізоди посилення мусону (10 червня, 5 липня, 21 липня і 13 серпня) відбулися в умовах позитивного екстремуму КШОЗ. Як вже було констатовано, цикли з періодом 28 і 14 діб є характерними для КШОЗ. Шляхом вузько-смугової фільтрації, зазначені гармоніки були вилучені з часового ряду КШОЗ і показані на рисунку 6.

За результатами стандартизації гармонік КШОЗ з періодами 28 і 14 діб була розрахована інтегральна характеристика циклічних змін КШОЗ (рис. 7).

Умовно кажучи, графік на рисунку 7 побудований аналогічно графіку на рисунку 4. Враховуючи це очікувалося, що позитивні аномалії КШОЗ, як причина активізації мусону, повинні мати позитивний зсув у часі.

Враховано, що на дату 22 червня припадає зміна знаку довгоперіодних припливоутворюючих сил. З цієї причини дані за червень-серпень 2010 року, було поділено на дві окремі вибірки. Були сформовані вибірки перелічених часових рядів до і після 23 червня 2010 р., і розраховані функції когерентності та фазового зсуву між часовими рядами, наведеними на рисунках 4 та 7. Для двох зазначених вибірок було проведено взаємний спектральний аналіз, результати якого наведено у таблиці 5.

Відповідно до виконаних розрахунків для часових рядів, наведених на рисунках 4, 7, визначено, що до 23 червня позитивна аномалія КШОЗ випереджає посилення штормових умов, а після 23 червня штормові умови посилюються на фазу зниження значень КШОЗ. Важливо констатувати, що когерентність оцінена в інтервалі 0,88-0,87,

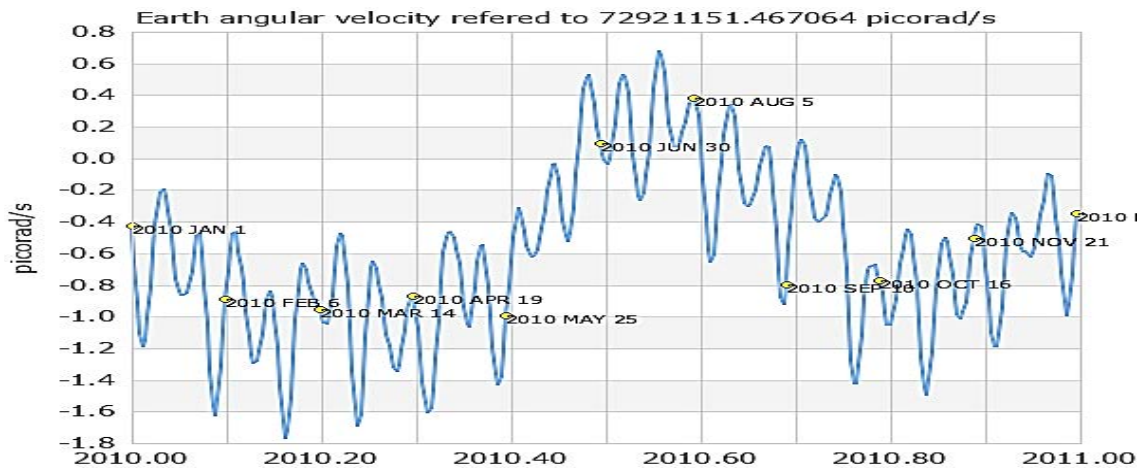


Рис. 5. Зміни у часі КШОЗ у 2010 р.

Джерело: [20]

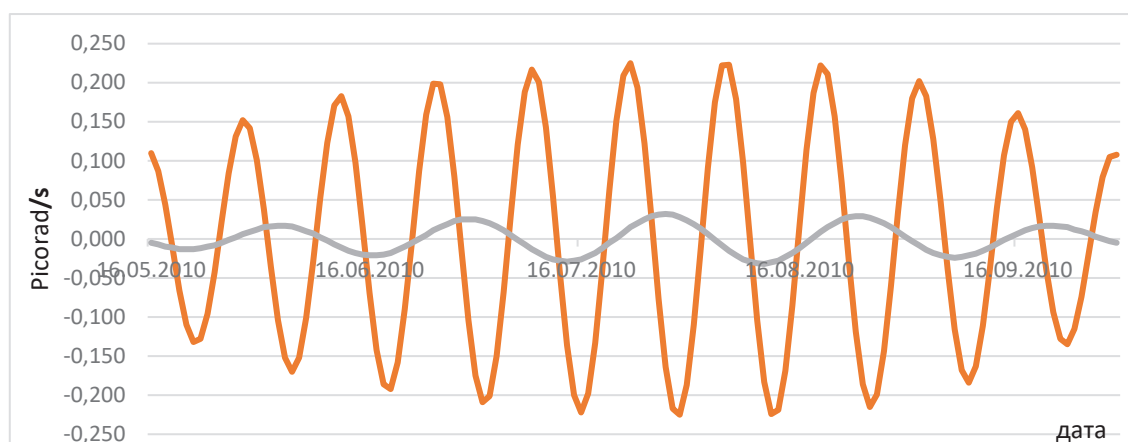


Рис. 6. Графіки змін у часі амплітуд гармонік з періодом 28 (зелений) і 14 діб, вилучених з часового ряду КШОЗ

Джерело: власна розробка авторів

тобто однакова для обох вибірок. З метою перевірки отриманих результатів було задіяно кореляційний аналіз (табл. 6).

В результаті перевірки було підтверджено, що до 23 червня штормові умови формуються через 3-4 доби після максимуму КШОЗ, а після 22 червня хвилі формуються за 3 доби перед максимумом КШОЗ. До 23 червня:

- мусонна система ще формується;
- вітер і хвилювання є залежними відносно зовнішніх впливів;
- КШОЗ може виступати як *ініціюючий сигнал* і тому причина випереджає наслідок.

Після 23 червня:

- мусонна циркуляція вже сформована;

- атмосферні процеси стають самопідтримуваними;
- хвилювання океану реагує на вітрові структури, а не на зовнішній повільний фактор.

Тобто, після 22 червня домінує керування з боку вже збудженої мусонної циркуляції.

Після 22 червня спостерігається зміна знаку фазового зсуву між оціночними параметрами, що свідчить про перехід мусону в інший динамічний режим. У цьому режимі взаємодія змінних визначається спільним фоновим керуванням і внутрішніми зворотними зв'язками, внаслідок чого часові зсуви втрачають прямий причинний зміст.

Висновки. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що традиційне уявлення про

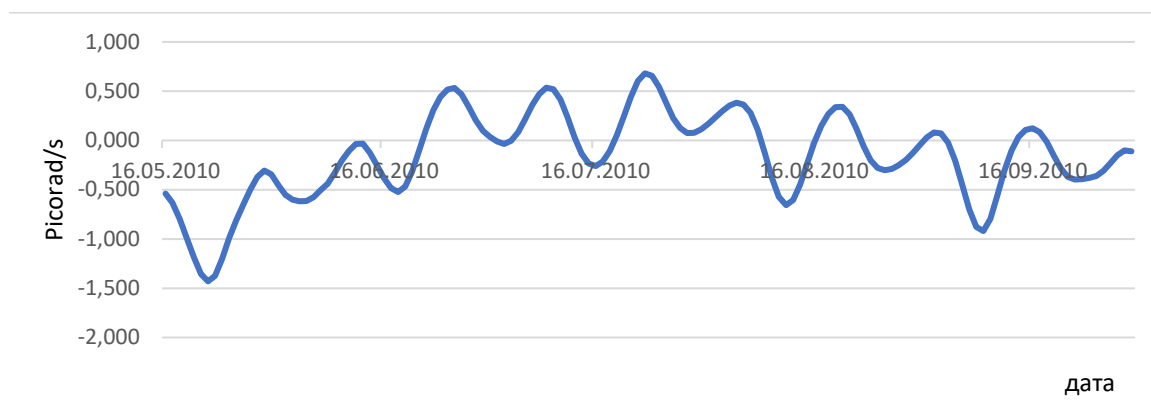


Рис. 7. Графік змін у часі амплітуди інтегральної характеристики циклічних змін 28 та 14 діб (відновлений графік циклічних змін КШОЗ)

Джерело: власна розробка авторів

Таблиця 5

Результати взаємного спектрального аналізу відтворених часових рядів циклічної складової мінливості КШОЗ, як причини, і висот поверхневих хвиль, як наслідок, за термін дії літнього мусону 2010 р. (з розділенням на дві фази до і після дати 23 червня)

Характеристика	До 23.06 28 діб	До 23.06 14 діб	Після 23.06 28 діб	Після 23.06 14 діб	До 23.06 сумарно	Після 23.06 сумарно
Когерентність	0,41	0,73	0,39	0,55	0,88	0,87
Фазовий зсув	-89 °	-73 °	43 °	81 °	100°	-95°

Джерело: власна розробка авторів

Таблиця 6

Результати змін значень коефіцієнту кореляції між часовими рядами відтворених характеристик КШОЗ та висот поверхневих хвиль до і після 23 червня, зсунутих один відносно другого на 0-5 діб

Тривалість часу зсуву даних	Значення коефіцієнта кореляції (КШОЗ -хвилі) до 23 червня	Значення коефіцієнта кореляції (хвилі - КШОЗ) після 23 червня
Без зсуву	-0,17	0,05
Зсув 1 день	0,25	0,36
2 дні	0,65	0,59
3 дні	0,89	0,71
4 дні	0,89	0,67
5 днів	0,71	0,49

Джерело: власна розробка авторів

липнево-серпневий максимум небезпечних хвильових умов у Аравійському морі під час літнього мусону є потребує уточнення. Для підвищення безпеки мореплавства доцільно враховувати можливість ранніх (червневих) штормових максимумів і підвищеної мінливості хвилювання, особливо в роки з аномальним проявом мусонної циркуляції.

Встановлено, що поверхневе хвилювання в Аравійському морі під час літнього мусону характеризується не лише сезонною, а й вираженою внутрішньосезонною мінливістю яка має суттєве значення для прогнозування навігаційних ризиків у період червень–серпень і яка проявлена чергуванням штормових і квазіштильових умов, що ускладнює оперативне планування мор-

ських перевезень. Наявність циклічних складових означає, що небезпечні для мореплавства умови можуть формуватися незалежно від середньосезонної сили мусону.

Практичне значення проведеного аналізу полягає в можливості використання виявлених закономірностей для уточнення внутрішньосезонних прогнозів хвильових умов, оптимізації маршрутів суден, планування графіків рейсів і, як результат, зниження аварійних ризиків у Аравійському морі.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні часових рядів спостережень, вдосконаленні методів прогнозування внутрішньосезонної мінливості та інтеграції отриманих результатів у прикладні системи підтримки прийняття рішень у судноплавстві.

Список літератури:

1. Webster P. J. The elementary monsoon. *Monsoons* / ed. by J. Fein, P. Stephens. New York: Wiley, 1987. P. 3–32.
2. Gadgil S. The Indian monsoon and its variability. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2003. Vol. 31. P. 429–467.
3. Krishnamurti T. N., Bhalme H. N. Oscillations of a monsoon system. Part I. Observational aspects. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1976. Vol. 33. P. 1937–1954.
4. Meehl G. A. The annual cycle and interannual variability in the tropical Pacific and Indian Ocean regions. *Monthly Weather Review*. 1987. Vol. 115. P. 27–50.
5. Gill A. E. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1980. Vol. 106. P. 447–462.
6. Indian monsoons under close scrutiny of scientists. URL: <https://courier.unesco.org/ru/articles/indiyskie-mussony-pod-pristalnym-vnimaniem-uchenykh> (дата звернення: 12.09.2024).
7. Максимов И. В. Зміна швидкості обертання Землі та баричне поле північної півкулі Землі. 1973. Т. 210, № 1. С. 67–70.
8. Peixoto J. P., Oort A. H. *Physics of Climate*. New York: American Institute of Physics, 1992. 520 p.
9. Сидоренков Н. С., Сумерова К. А. Геодинамічні причини декадних змін клімату. 2012. Вип. 348. С. 195–214.
10. Wang B. *The Asian monsoon*. Berlin: Springer, 2006. 787 p.
11. Holton J. R. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 4th ed. – Amsterdam: Elsevier, 2004. 535 p.
12. Sarachik E. S., Cane M. A. *The El Niño–Southern Oscillation Phenomenon*. Cambridge : Cambridge University Press, 2010. 385 p.
13. Lambeck K. *The Earth's variable rotation: Geophysical causes and consequences*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980. 449 p.
14. Hager B. H., Clayton R. W., Richards M. A., et al. Lower mantle heterogeneity, dynamic topography and the geoid. *Nature*. 1985. Vol. 313. P. 541–545.
15. Schott F. A., McCreary J. P. The monsoon circulation of the Indian Ocean. *Progress in Oceanography*. 2001. Vol. 51. P. 1–123.
16. Кучеренко Н. В., Томчаковський Г. Г., Капочкіна М. Б., Калініченко Є. В. Умови формування мусонного вітру над Індоекеанською аномалією сили тяжіння. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. – Київ: ДУІТ, 2025. Вип. 1 (42). С. 115–130. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42>.
17. Томчаковський Г. Г., Капочкіна М. Б. Результати дослідження причин мусонного вітру над Індоекеанською аномалією сили тяжіння. *Водний транспорт*. 2025. № 2 (43). С. 57–74. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.05>.
18. Blewitt G., Lavallée D., Clarke P., Nurutdinov K. A new global mode of Earth deformation: seasonal cycle detected. *Science*. 2001. Vol. 294, No. 5550. P. 2342–2345. DOI: 10.1126/science.1065328.
19. AVISO+. Sea State and Wind Products [Electronic resource]. – Access mode: <https://seewater.aviso.altimetry.fr/#!/&page=isv-mainPage> (date of access: 12.02.2026).

20. International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://hpiers.obspm.fr/> (дата звернення: 12.09.2024).
21. Томчаковський Г. Г., Капочкіна М. Б., Калініченко Є. В. Дослідження мінливості «мусонної депресії» у Бенгальській затоці. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. – 2025. Вип. 51. С. 250–262. DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344961.
22. Колесник А. В., Доля В. Д., Кучеренко Н. В. Використання ГІС для вивчення причин формування мусонів Індійського океану. *Часопис картографії*. 2015. Вип. 12. С. 82–89. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh_2015_12_11 (дата звернення: 12.09.2024).
23. Бороздич Э. В. Вплив короткоживучих підкіркових локальних збурень на літо-, гідро- та атмосферу. *Наукові читання з космонавтики та авіації*. Наука, 1990. С. 130–140.
24. Войтенко С. П., Учитель И. Л., Ярошенко В. Н., Капочкін Б. Б. Геодинаміка. Основи кинематичної геодезії. Одеса: Астропринт, 2007. – 259 с.
25. Учитель И. Л., Ярошенко В. Н., Капочкін Б. Б. Геодинаміка. Основи динамічної геодезії / під ред. С. П. Войтенко. Одеса: Астропринт, 2008. 311 с.
26. Нова парадигма акумулятивного рельєфоутворення у мілководних районах океанів та морів: монографія том 3 / Ігор Іванович Гладких, Маргарита Борисівна Капочкіна, Наталія Василівна Кучеренко, Борис Борисович Капочкін. Одеса: НУ «ОМА», 2021. 199 с.
27. Global Climate Report: 2010 [Електронний ресурс]. NOAA NCEI. Режим доступу: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/201013> (дата звернення: 12.09.2024).
28. India Meteorological Department. *Climate Change Assessment over India*. New Delhi: IMD, 2010
29. National Oceanic and Atmospheric Administration. *Global Climate Report – 2010*. NOAA; United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. *Pakistan Floods 2010: Situation Report*. UNOCHA
30. Bangladesh Meteorological Department. *Annual Climate Summary 2010*. Dhaka: BMD, 2011
31. El Niño and the record years 1998 and 2016 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.realclimate.org/index.php/archives/2017/11/el-nino-and-the-record-years-1998-and-2016/> (дата звернення: 12.09.2024).

Tomchakovsky G.G., Kucherenko N.V., Kapochkina M.B. THE SUMMER MONSOON VARIABILITY IN THE ARABIAN SEA

The paper analyzes the features of intraseasonal variability of surface waves in the Arabian Sea during the summer monsoon from the standpoint of ensuring navigation safety and efficiency of maritime transport. Based on the satellite altimetry observation data for 2010–2019, the statistical and spectral characteristics of wind speed and wave height, namely, the contribution of cyclical components, are studied. Special attention is paid to the analysis of short- and medium-term oscillations that form the intraseasonal structure of the wave field and determine the variability of sea conditions within one monsoon period. It is depicted that the maximum of storm activity can shift from August to June, which significantly complicates navigation planning in the Arabian Sea. Such a shift in peak wave activity values has important consequences for the organization of maritime transportation, since traditional ideas about seasonal dynamics may not correspond to the actual conditions of a particular year. It has been established that at different stages of the development of the summer monsoon, the process of wave regime formation under the influence of geophysical factors can be divided into the first stage (before the solstice date), when the cause precedes the effect, and the second phase (after the specified date), when wave conditions are formed in a self-sustaining mode. Such a two-phase structure of the wave process development allows for a more accurate interpretation of the mechanisms of interaction of atmospheric and oceanic factors and clarifies the understanding of the dynamics of the monsoon circulation. Additionally, it is demonstrated that the variability of wave characteristics has a complex spectral composition, which necessitates the use of complex approaches to analysis and forecasting. The results obtained emphasize the relevance of studying the intraseasonal variability of the summer monsoon in the Arabian Sea and taking into account adverse weather conditions to optimize maritime logistics and reduce risks for shipping. The practical significance of the work lies in the possibility of using the obtained dependencies to increase the accuracy of forecasting wave conditions, planning ship routes, and minimizing the impact of dangerous hydrometeorological phenomena on the functioning of maritime transport.

Keywords: *summer monsoon, the Arabian Sea, intraseasonal variability, surface turbulence, storm activity, satellite altimetry, maritime logistics, maritime navigation, shipping safety, geophysical factors.*

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026