

© Томчаковський Г. Г., Кучеренко Н. В., Капочкіна М. Б.

МІЖРІЧНА МІНЛИВІСТЬ ЛІТНЬОГО МУСОНУ У АРАВІЙСЬКОМУ МОРІ (ФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ)

У роботі проаналізовано особливості міжрічної мінливості поверхневого хвилювання в зоні дії літнього Індокіанського мусону у період 2010–2017 років у контексті задач морської логістики та безпеки мореплавства. Дослідження базується на узагальненні довготривалих рядів спостережень, що дозволило виявити закономірності формування хвильового режиму в різні роки та оцінити ступінь його варіабельності. На основі статистичного аналізу показано, що аномальні режими хвилювання можуть формуватися як у вигляді підвищеної інтегральної інтенсивності процесу, так і у формі сезонної динаміки без виражених екстремальних проявів. Це свідчить про складний характер міжрічної мінливості, який не завжди проявляється через очевидні штормові події, але може суттєво впливати на загальні умови мореплавства.

Встановлено, що класичні кліматичні індекси, зокрема ENSO та Індійськоокеанський диполь, не забезпечують однозначного пояснення фактичних відмінностей хвильового режиму Аравійського моря у зазначені роки. Це вказує на необхідність розширення існуючих підходів до інтерпретації кліматичних процесів і врахування додаткових чинників. Для ідентифікації причин виникнення аномальних проявів мусонної циркуляції обґрунтовано доцільність залучення геофізичних процесів до загальновідомого переліку впливових погодуутворюючих факторів. В результаті проведеного факторного аналізу міжрічної мінливості літнього мусону за 4-ма ознаками (було виділено 2010, 2013, 2015 та 2017 роки), на кількісному рівні підтверджено вплив мінливості кутової швидкості обертання Землі на літній мусон Аравійського моря. Залежності, які отримали у результаті цього аналізу дозволяють глибше зрозуміти механізми формування хвильового режиму та уточнити роль глобальних геофізичних процесів у динаміці мусонної циркуляції.

Отримані результати можуть бути використані для підвищення надійності прогнозування хвильових умов літнього мусону, оптимізації планування морських перевезень і зниження ризиків для судноплавства в Аравійському морі. Практичне значення дослідження полягає у можливості врахування виявлених закономірностей при розробленні моделей прогнозування та прийнятті управлінських рішень у сфері морської логістики.

Ключові слова: безпека мореплавства; літній Індокіанський мусон; поверхневе хвилювання; міжрічна мінливість мусонів; ENSO; Індокіанський диполь; геофізичні чинники.

Вступ

Аравійське море є одним із ключових вузлів світової логістики, де зосереджені судноплавні маршрути між Європою, Близьким Сходом та Південною Азією. Саме в цьому регіоні щорічно формується літній Індокіанський мусон, що характеризується сильними вітрами і значним хвилюванням, які знижують безпеку мореплавства.

Як показано в роботах [1-4], класичне пояснення мусонної циркуляції базується на термічному контрасті між сушею та океаном. Динамічний підхід [5] доповнює це уявлення роллю загальної циркуляції атмосфери та планетарних хвиль. Проте, аналіз фактичних спостережень свідчить, що ці моделі не здатні пояснити реальну причину виникнення мусонних вітрів в Аравійському морі.

Особливий інтерес викликає міжрічна мінливість літнього мусону. Але, як зазначено у роботі [6], сучасні чисельні прогностичні моделі демонструють значні похибки прогнозування міжрічної мінливості мусонного вітру, що істотно знижує їх практичну цінність для забезпечення безпеки

мореплавства. Це може свідчити про неврахування у цих моделях впливових факторів, відповідальних за міжрічну мінливість літнього мусону.

У нашому дослідженні пропонується розглядати літній мусон в Аравійському морі в ширшому фізичному контексті – як елемент Індоканської системи океан–атмосфера, чутливий до змін гравітаційного поля, у тому числі за рахунок сезонної мінливості швидкості обертання Землі. Такий підхід, обґрунтований у наукових працях [7-9], дозволяє пояснити як регулярність виникнення літнього мусону, так і його міжрічну мінливість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз наукових джерел свідчить, що дослідження мусонної циркуляції умовно можна згрупувати у три основні напрями.

Перший напрям представлений роботами, у яких мусонний клімат розглядається як 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 часом максимального прогріву суші, який фіксується наприкінці квітня, та початком мусонного вітру над Аравійським морем, який фіксується у червні і триває до вересня [6, 10].

Другий напрям охоплює динамічні моделі мусонної циркуляції, що базуються на загальній циркуляції атмосфери [5, 11]. Однак у тропічних широтах, зокрема над Аравійським морем, горизонтальна складова сили Кореолісу є малою, що істотно обмежує доцільність застосування геострофічного балансу. Як показано в [6, 12], величини баричних градієнтів, які спостерігаються в літній період, не забезпечують кількісно узгодженого пояснення реальної швидкості мусонних вітрів.

Третій напрям досліджень пов'язаний із врахуванням впливу геофізичних процесів на літній мусон у Аравійському морі [7-9, 13]. У цих роботах показано, що навіть незначні, але циклічні варіації регіонального гравітаційного поля та прискорення вільного падіння під час літнього максимуму швидкості обертання Землі навколо своєї осі, можуть призводити до перебудови регіонального баричного поля і відповідних змін у системі океан–атмосфера в Аравійському морі. Особливу роль у цьому контексті приділяється від'ємній аномалії геоїда Індійського океану, просторові та часові характеристики якої детально розглянуті в [14, 16, 17]. Наявність цієї аномалії створює умови для формування антициклонічної циркуляційної комірки над її центром, яка над Аравійським морем у червні – серпні співпадає з напрямком мусонного вітру.

В окрему групу можна виділити дослідження сезонного виникнення Сомалійської течії, як додаткового фактору формування літнього мусону за рахунок утворення апвелінгу холодних вод в Аравійському морі [6, 15]. Аналіз сезонної еволюції цих процесів свідчить про те, що генерація Сомалійської течії і, як наслідок, апвелінгу відбувається за відсутності південно - західного вітру, тобто передуює виникненню мусонних вітрів Аравійського моря. Це суперечить класичному уявленню про виключно атмосферне походження мусонної циркуляції, та свідчить про активну роль океану у формуванні просторових термічних контрастів у приводному шарі повітря і, відповідно, у щорічній генерації та самопідтримці мусонного вітру у червні-серпні, як прояву процесу зі зворотнім позитивним зв'язком.

Сукупність результатів наукових досліджень, наведених у працях [7-9, 16, 17], вказує на необхідність врахування просторово-часової мінливості гравітаційного потенціалу у кількісних розрахунках міжрічної мінливості мусонної циркуляції в Індоканському регіоні. Це може підвищити якість забезпечення безпеки мореплавства в одному з найнебезпечніших регіонів світового судноплавства.

У роботі [16] вперше на кількісному рівні розглянуто механізм формування літнього мусонного вітру як наслідок взаємодії атмосфери з великомасштабною від'ємною аномалією сили тяжіння Індійського океану. Результати подальшого розвитку цього наукового підходу наведено в роботі [17], де показано, що мінливість інтенсивності мусонного вітру не може бути пояснена виключно варіаціями атмосферного тиску. У роботі [18] зроблено важливе наукове відкриття глобальної деформації Землі з річним циклом і екстремумами у березні і вересні.

Постановка проблеми

Одним із інструментів дослідження мусонного клімату обрано факторний аналіз. У виконаному нами дослідженні [16] на базі статистичних розрахунків було показано, що у травні 1997 року під час порушення гравітаційного балансу Землі ззовні, зафіксовано і аномалію мусонного клімату. У середині липня 1997 року зазначена аномалія почала поступово зникати. Формування відповідної аномалії поля геопотенціалу на рівні 200 гПа призводило до зміщення на південь кордону західних вітрів середніх широт [19].

Впливовий геодинамічний фактор регіонального рівня, що швидкоплинно (листопад 2001 - січень 2002 року) охопив Афро-Аравійсько-Індійський регіон і викликав аномальний літній мусон 2002 року, досліджувався нами в роботах [16, 17, 20, 21].

У продовження цього наукового напрямку, з метою визначення особливостей міжрічної мінливості літнього мусону Аравійського моря у 2010-2017 роках, було залучено низку загальновідомих факторів можливого зовнішнього впливу на мусонну циркуляцію.

Фактор № 1 – глобальна аномалія сейсмічних процесів планетарного масштабу в червні–вересні 2010 року. За даними [22], глобальна кількість опадів у 2010 році була максимальною за весь період інструментальних спостережень (з 1900 року). Принциповою особливістю 2010 року є синхронність антициклонічної аномалії над європейською територією РФ, що вважається однією з найпотужніших антициклонічних аномалій у Північній півкулі за весь період інструментальних спостережень, із нетиповими процесами в інших регіонах Північної півкулі, зокрема з аномально тривалим мусонним сезоном у Південній Азії та катастрофічною повінню в Пакистані.

Фактор № 2 – 2013 рік на глобальному рівні характеризувався вираженою кліматичною аномальністю: цей рік належить до найтепліших за весь інструментальний період. Характерною рисою 2013 року стало зростання частоти та інтенсивності екстремальних опадів у тропічних і субтропічних широтах. На регіональному рівні літній Індокіанський мусон 2013 року є прикладом максимальної інтенсивності референтної мусонної циркуляції.

Фактор № 3 – Ель-Ніньо 2015 року, для якого були характерні ослаблення пасатної циркуляції, перебудова системи екваторіальних течій та зміщення внутрішньотропічної зони конвекції. У контексті мусонних процесів 2015 рік відрізнявся підвищеною мінливістю атмосферної циркуляції, що суттєво вплинуло на стабільність літнього мусону [23].

Фактор № 4 – Ла-Нінья 2017 року, яка зумовила посилення пасатної циркуляції, інтенсифікацію західного переносу теплих вод і підсилення апвелінгу вздовж екватора. Це сприяло стабілізації великомасштабної циркуляції в тропіках. У мусонному контексті 2017 рік характеризувався більш упорядкованою структурою літнього мусону та зменшенням екстремальних відхилень.

Таким чином, у роботі виокремлено чотири фактори імовірного впливу процесів глобального масштабу на Індокіанську атмосферну циркуляцію мусонного типу. Визначено, що період 2010–2017 років на глобальному рівні характеризується високою міжрічною мінливістю ENSO:

2010 рік характеризувався сильною фазою Ла-Нінья, яка супроводжувалася посиленням пасатної циркуляції;

2013 рік співпав з періодом, коли роль ENSO була мінімальною, що робить 2013 рік показовим для аналізу процесів, не пов'язаних безпосередньо з ENSO;

2015 рік ознаменувався розвитком одного з найпотужніших Ель-Ніньо за весь інструментальний період спостережень і супроводжувався значним ослабленням пасатної циркуляції, перебудовою екваторіальних течій;

2017 рік фази Ла-Нінья, яка супроводжувалася посиленням пасатної циркуляції, інтенсифікацією апвелінгу.

Визначено також, що зазначений період на регіональному рівні характеризується високою міжрічною мінливістю IOD:

2010 рік відзначався позитивною фазою IOD, що супроводжувалася підвищенням температури Аравійського моря (прояви IOD були нерівномірними у часі);

2013 рік характеризувався нейтральною фазою IOD, тобто максимальна активність Індокоеанського мусону 2013 року реалізовувалася без домінуючого впливу IOD;

2015 рік відзначався позитивною фазою IOD, яка співала з Ель-Ніньо; і навіть за умов позитивного IOD мусон був пригніченим, що вказує на відсутність залежності між фазою IOD та інтенсивністю мусону;

2017 рік характеризувався нейтральною фазою IOD, коли спостерігалось пригнічення мусонної активності. Таким чином, можна зробити висновок, що IOD не може розглядатися як самодостатній фактор міжрічної мінливості Індокоеанського мусону.

Індійські мусони у 2010–2017 роках також характеризувалися як:

- 2013 р. – еталонний потужний мусон;
- 2010 р. – потужний фрагментований мусон;
- 2015 р. – найслабший фрагментований мусон;
- 2017 р. – стабільно слабкий мусон.

Для впорядкування виявлених факторів впливу на характеристики мусонної циркуляції міжрічного масштабу нам здалося можливим використати фізико - статистичний метод факторного аналізу.

Для розв'язання завдань факторного аналізу використано дані проєктів AVISO+ (просторово-часові зміни поверхневого хвилювання в Аравійському морі), а також матеріали сайтів [24] (синоптичні карти атмосферного тиску) і [25] (результати вимірювань кутової швидкості обертання Землі (КШОЗ)). Також були враховані результати досліджень [8, 16, 17, 26, 27], що підтверджують вплив геодинамічних процесів на мусонну циркуляцію атмосфери над Аравійським морем.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для визначення зв'язку міжрічної відмінності літнього Індокоеанського мусону з геофізичними процесами було використано факторний аналіз. Було проаналізовано зміни баричного поля над Аравійським морем у літній сезон (червень, липень, серпень). У якості вихідних даних використано синоптичні карти з [24]. Важливо зазначити, що за результатами аналізу синоптичних карт, літні сезони 2010–2017 років практично не відрізнялися за конфігурацією баричного поля над Аравійським морем. Це свідчить про те, що відмінності в міжрічній інтенсивності та структурі літнього мусону в зазначені роки не можуть бути наслідком градієнтів атмосферного тиску. Тому у якості об'єктивної кількісної характеристики інтенсивності літніх мусонів у 2010–2017 роках ми вибрали характеристики поверхневого хвилювання в Аравійському морі, отримані за даними проєкту AVISO (щоденні поля поверхневих хвиль). Для літнього сезону (червень–серпень) в акваторії Аравійського моря було розраховано статистичні оцінки середнього значення, дисперсії та накопиченої суми позитивних екстремумів висот хвиль (табл. 1).

Таблиця 1 – Статистичні оцінки максимальних висот хвиль в Аравійському морі за червень-серпень 2010-2017 рр.

Рік	Середнє (м)	Дисперсія	Накопичена сума висот хвиль (м)
2010	3,7	0,52	345
2011	3,6	0,21	332
2012	3,7	0,19	341
2013	4,0	0,59	369
2014	3,7	0,75	340
2015	3,5	0,76	319
2016	3,7	0,49	341
2017	3,5	0,35	321

Отримані результати об'єктивно підтверджують, що 2013 рік чітко виділяється як рік максимальної активності літнього мусону: середня висота хвиль досягала 4 м, а накопичена сума висот хвиль за сезон була максимальною серед усіх років вибірки.

На противагу, 2015 та 2017 роки, обрані за екстремальним проявом системи Ель-Ніньо – Ла-Нінья, характеризуються мінімальними значеннями висоти хвиль ($\approx 3,5$ м) та екстремально низькими значеннями накопиченої суми висот хвиль, що свідчить про пригнічення літньої мусонної циркуляції. У 2015 році, який відповідає фазі Ель-Ніньо (фактор №3), зафіксовано максимальну дисперсію хвилювання (0,76), тобто, найвищу внутрішню сезонну мінливість. З огляду на те, що за умов епізодичних штормів середнє значення перевищує моду, є підстави вважати, що у 2015 році мусонний вітер мав фрагментований характер, періодично перериваючись штильовими умовами. Це опосередковано підтверджується найменшим значенням накопиченої суми висот хвиль, що відображає низьку інтегральну енергію мусону впродовж сезону. Отже, фактор Ель-Ніньо у 2015 році суттєво пригнічував мусонну циркуляцію в Аравійському морі.

Водночас, практично такий самий інтегральний ефект був зафіксований у 2017 році, що відповідає фазі Ла-Нінья (фактор №4) – антиподу Ель-Ніньо за знаком. Проте, на відміну від 2015 року, 2017 рік характеризувався меншою дисперсією хвилювання, тобто більш упорядкованою структурою літнього мусону без різких екстремальних відхилень. Таким чином, протилежні фази ENSO (Ель-Ніньо та Ла-Нінья) призводять до однакового результату – ослаблення літнього мусону, але реалізуються через різні механізми: у фазі Ель-Ніньо – через підвищену нестійкість і фрагментацію циркуляції; у фазі Ла-Нінья - через стабілізоване пригнічення.

Узагальнюючи наведені результати, можна зробити висновок, що система Ель-Ніньо – Ла-Нінья не є визначальним фактором міжрічної мінливості сили літнього мусону в Аравійському морі.

З метою поглибленого застосування факторного аналізу було вирішено виконати апроксимацію часових рядів поверхневого хвилювання у літній сезон 2010-2017 років поліномом другого ступеня:

$$= A \cdot T^2 + B \cdot T + C, \quad (1)$$

де, H – висота хвилі;

T – календарна дата літнього мусону;

A, B, C – відповідні розрахункові коефіцієнти поліноміальної регресійної моделі.

У результаті дослідження часової мінливості максимальних значень поверхневих хвиль в Аравійському морі під час літнього мусону було підтверджено, що типовий розвиток літнього мусону має чітко виражену сезонну структуру. Як правило, мусон починається на початку червня, досягає екстремальних значень у липні та завершується наприкінці серпня. Таким чином, період червень–серпень об'єктивно описується параболою з позитивним екстремумом у середині сезону. Коефіцієнти полінома в різні роки змінюватимуться за умов дії аномального зовнішнього впливу. Якщо міжрічні відмінності коефіцієнтів поліноміальної апроксимації є статистично значущими, то це створює формальну підставу для застосування факторного аналізу. Результати поліноміальної апроксимації літнього мусону за показником максимальних щоденних значень поверхневих хвиль у вигляді графіків показано на рис. 1.

За результатами якісного (візуального) аналізу отримані графіки умовно було поділено на дві групи: роки з очікуваним типом параболічної залежності (2014, 2015, 2016) та роки з аномальним типом графіку (2010, 2011, 2012, 2013, 2017).

Важливо відмітити, що мусон 2010 року не виділявся ні мінімальними, ні максимальними значеннями інтегральних показників поверхневого хвилювання. Проте аналіз параметрів поліноміальної апроксимації (табл. 2) свідчить про принципову відмінність мусону 2010 року. Зокрема, для 2010 року характерні екстремальні значення коефіцієнтів A, B і C , висока дисперсія коефіцієнта A а також максимальні значення медіани та середнього квадратичного відхилення залишків апроксимації поліноміальної моделі. Ці особливості вказують на порушення типової параболічної структури сезонного ходу поверхневого хвилювання, зростання випадкової складової та нестійкість моделі

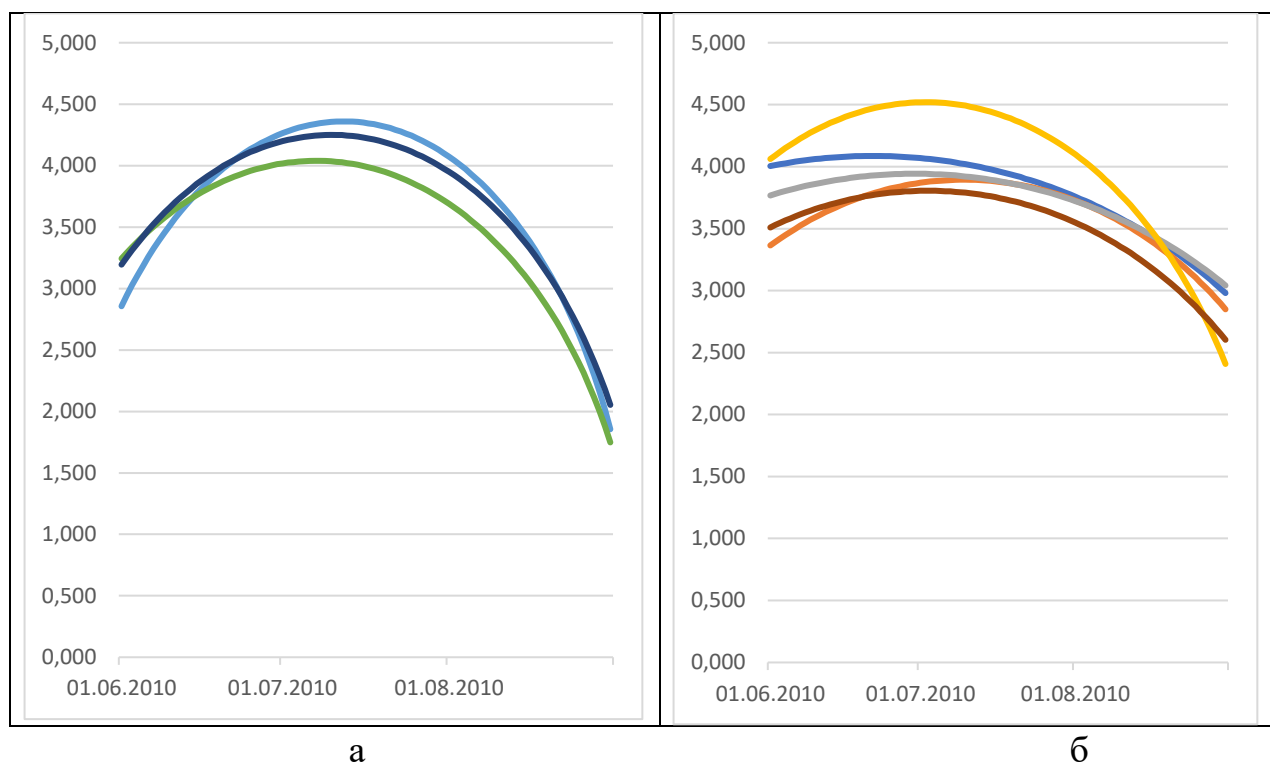


Рисунок 1 – Результати поліноміальної апроксимації літнього мусону за показником максимальних щоденних значень поверхневих хвиль: а) роки з очікуваним типом параболи (2014 – блакитна лінія, 2015 – помаранчева лінія, 2016 – синя лінія); б) роки з аномальним типом графіку (2010 – блакитна лінія, 2011 – червона лінія, 2012 – зелена лінія, 2013 – фіолетова лінія, 2017 – коричнева лінія).

У табл. 2 наведено статистичні характеристики поверхневого хвилювання (максимальна висота хвиль) в Аравійському морі (X – середнє значення, D – дисперсія, Σ – накоплена сума), коефіцієнти полінома другого ступеня (A , B , C), дисперсія коефіцієнту A , середнє квадратичне відхилення (СКВ) моделі поліноміальної апроксимації, медіана та СКВ залишків поліноміальної апроксимації поверхневого хвилювання під час літніх мусонів у 2010-2017 роках.

Таблиця 2 – Статистичні характеристики поверхневого хвилювання в Аравійському морі, у тому числі, поліноміальної апроксимації часових змін хвилювання

Рік	X	D	Σ	A	Дисперсія $A \cdot 10^{-4}$	B	C	СКВ моделі	Залишки моделі медіана	Залишки моделі СКВ
2010	3,7	0,52	345	-0,0002	8,4	0,0068	16,1	5,11	-0,92	5,02
2011	3,6	0,21	332	-0,0025	4,5	0,204	11,11	2,75	0,4	2,4
2012	3,7	0,19	341	-0,0016	4,6	0,1	14,1	2,8	-0,31	2,74
2013	4,0	0,59	369	-0,004	7,7	0,26	16,1	4,65	-0,23	4,57
2014	3,7	0,75	340	-0,06	7,8	0,54	7,6	4,6	-0,88	4,52
2015	3,5	0,76	319	-0,04	9,2	0,33	10,2	5,6	-0,103	5,49
2016	3,7	0,49	341	-0,05	6,8	0,41	9,8	4,1	-0,53	4,06
2017	3,5	0,35	321	-0,02	5,9	0,14	12,2	3,6	-0,446	3,54

Результат порівняння статистичних характеристик полінома другого ступеня поверхневого хвилювання в Аравійському морі 2010 та 2015 років є особливо показовим. Якщо у 2015 році (фактор №3 – Ель-Нін'ю) ослаблення мусонної циркуляції чітко проявляється в інтегральних показниках (табл. 1) – мінімальній середній висоті хвиль, мінімальній накопиченій сумі та максимальній мінливості, то у 2010 році аномалія має прихований характер і виявляється лише через

аналіз поліноміального тренду та статистик залишків. Отже, 2010 рік є прикладом «скритної аномалії», яка не ідентифікується на етапі першого наближення.

Таким чином, 2010 рік (фактор №1) за об'єктивними статистичними даними відрізняється тим, що має:

- має екстремальні значення коефіцієнтів А, В і С;
- характеризується низькою достовірністю оцінки коефіцієнта А (велика дисперсія $A \cdot 10^{-4}$);
- демонструє максимальні значення медіани та СКВ залишків;
- має підвищені, але не екстремальні інтегральні показники хвилювання (дисперсія 0,52; накопичена сума 345).

Це означає, що у 2010 році аномалія не проявлялася як ослаблення або посилення мусону за середніми характеристиками, а виявлялася саме як порушення звичної сезонної еволюції хвилювання.

Узагальнюючи наведені результати, можна зробити висновок, що аналіз поліноміальних трендів і статистик залишків є критично важливим для ідентифікації аномальних років літньої мусонної циркуляції. Літній мусон в Аравійському морі реагує на зовнішній вплив не уніфіковано, а тому його коректний аналіз потребує одночасного врахування як енергетичних показників (середнє значення, накопичена сума), так і структурних характеристик (форма сезонного тренду, параметри апроксимації). Саме такий підхід є принципово важливим для подальших наукових досліджень і для задач прогнозування небезпечних умов мореплавства. Таким чином, аномальні роки вказують на вплив зовнішніх факторів, що порушують типову параболічну сезонну структуру хвилювання літнього мусону.

Якщо розглядати кутову швидкість обертання Землі (КШОЗ), як причину мінливості системи океан-атмосфера в районі літнього мусону в Аравійському морі, то за наявності вхідних даних за більш тривалий період (2002-2017 роки) можливості факторного аналізу суттєво збільшуються. Часові ряди КШОЗ були апроксимовані поліномом другого ступеня відповідно до алгоритму, задіяного для обробки часових рядів поверхневого хвилювання. Результати поліноміальної апроксимації літнього мусону за показником КШОЗ у вигляді графіків показано на рис. 2, 3.

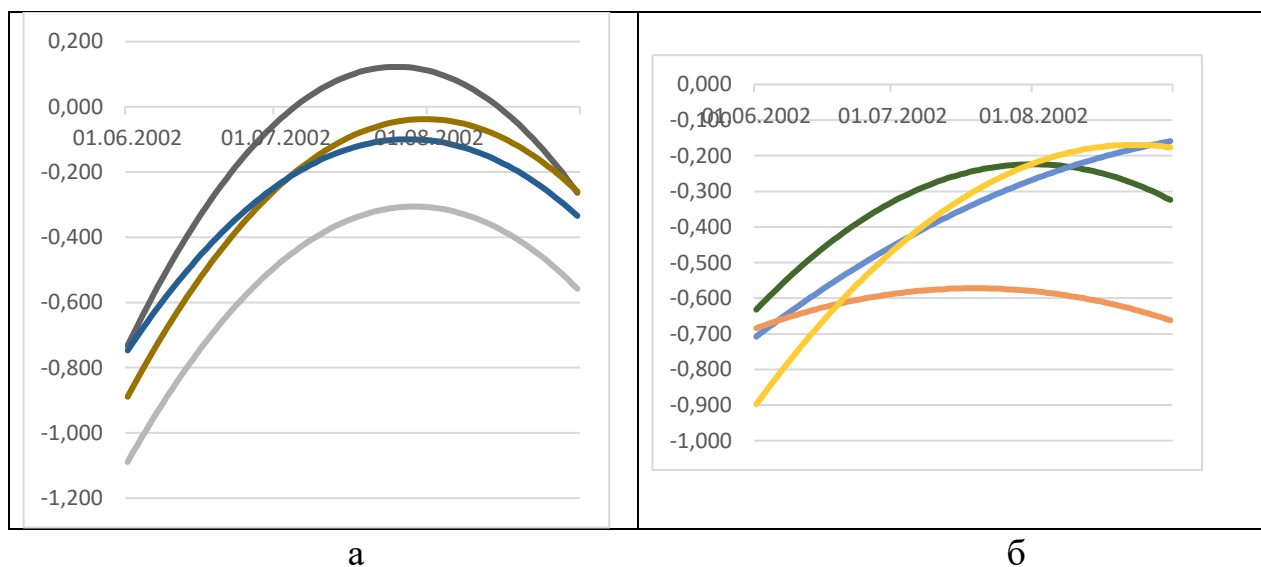


Рисунок 2 – Результати поліноміальної апроксимації КШОЗ під час літнього мусону: а) роки з очікуваним типом параболи (2010 - зелена лінія, 2011 - фіолетова лінія, 2012 - синя лінія, 2016 - салатна лінія); б) роки з аномальним типом графіку (2013 - коричнева лінія, 2014 - блакитна лінія, 2015 - рожева лінія, 2017 - фіолетова лінія).

За результатами суб'єктивного (візуального) аналізу даних розрахунків, загальна кількість графіків була розділена на дві групи. Перша група (роки з очікуваним типом параболи) включала: 2010,

2011, 2012, 2016 роки; а друга група (роки з аномальним типом графіку): графіки 2013, 2014, 2015, 2017 років.

Графіки поліноміальної апроксимації кутової швидкості обертання Землі у літній сезон (червень – серпень) демонструють наявність чітко вираженого сезонного екстремуму, який у більшості років може бути описаний параболою другого порядку. Разом із тим, уже на рівні графічного представлення помітно, що форма парабол істотно відрізняється між роками. В окремих випадках вершина параболи є чітко визначеною, симетричною та локалізованою в середині сезону, тоді як в інших – спостерігається асиметрія, сплюснення екстремуму або його зсув. Це означає, що навіть за наявності формально подібної апроксимації динамічна структура сезонної мінливості КШОЗ не є однорідною.

З досліджуваних 4-х факторів впливу на літній мусон, у першу групу потрапив 2010 рік, а у другу - 2013, 2015, 2017. Таким чином можна констатувати, що три (2013, 2015, 2017) з чотирьох років (2010, 2013, 2015, 2017) літнього мусону, обраних за критерієм факторного аналізу, відбулися в роки з аномальним типом КШОЗ під час щорічного позитивного екстремуму у червні – серпні. Результати поліноміальної апроксимації даних КШОЗ наведено у табл. 3.

Таблиця коефіцієнтів полінома другого ступеня (А, В, С), стандартних похибок коефіцієнта А та середньоквадратичного відхилення (СКВ) моделі дозволяє перейти від описової до структурної інтерпретації сезонної мінливості КШОЗ.

Коефіцієнт А визначає інтенсивність і форму сезонного екстремуму. Аналіз числових значень показує, що його діапазон є дуже широким: від слабо від’ємних значень до різко виражених негативних екстремумів. Це означає, що в різні роки швидкість формування та амплітуда сезонного максимуму КШОЗ істотно змінюється.

Таблиця 3 – Результати поліноміальної апроксимації даних КШОЗ

Рік	Коефіцієнт А*10 ⁻⁴	СКВ А *10 ⁻⁵	Коефіцієнт В	Коефіцієнт С	СКВ моделі
2002	-0,134	3,04	0,004	-0,21	0,183
2003	-1,68	1,81	0,016	-0,22	0,109
2004	-2,08	1,53	0,022	-0,44	0,093
2005	-0,98	2,04	0,012	-0,035	0,123
2007	-0,69	1,36	0,015	-0,90	0,082
2008	-0,73	1,09	0,012	-0,55	0,066
2009	-2,40	1,38	0,028	-1,07	0,083
2010	-2,90	1,17	0,032	-0,76	0,07
2011	-2,34	1,04	0,029	-0,92	0,063
2012	-2,01	1,83	0,023	-0,77	0,11
2013	-1,10	1,47	0,014	-0,64	0,09
2014	-4,03	1,34	0,009	-0,71	0,081
2015	-4,86	1,09	0,005	-0,69	0,120
2016	-2,32	1,68	0,027	-1,12	0,100
2017	-1,06	1,64	0,016	-0,91	0,100

Аналіз графіків на рис. 2 свідчить про міжрічний максимум і максимальну кривизну позитивного екстремуму КШОЗ у 2010 році; його максимальну асиметрію екстремуму від липня до серпня. Тобто, 2010 рік, обраний за фактором №1, є прикладом «скритної аномалії КШОЗ».

Таким чином, в результаті проведених досліджень міжрічної мінливості літнього мусону за визначеними факторами, які виділяли 2010, 2013, 2015 та 2017 роки, було підтверджено незвичайний характер, за ознакою «впливового» на мусон, фактору КШОЗ саме у ці роки.

За наявності вхідних даних за період 2002-2017 роки, виникла можливість виконати дослідження і стосовно мусонів 2002 і 2005 років, що сформувалися в умовах геофізичних аномалій (за даними [16,

17]) регіонального і глобального масштабів відповідно. На рис. 3 наведено результати поліноміальної апроксимації літнього позитивного екстремуму КШОЗ у 2002-2009 роках.

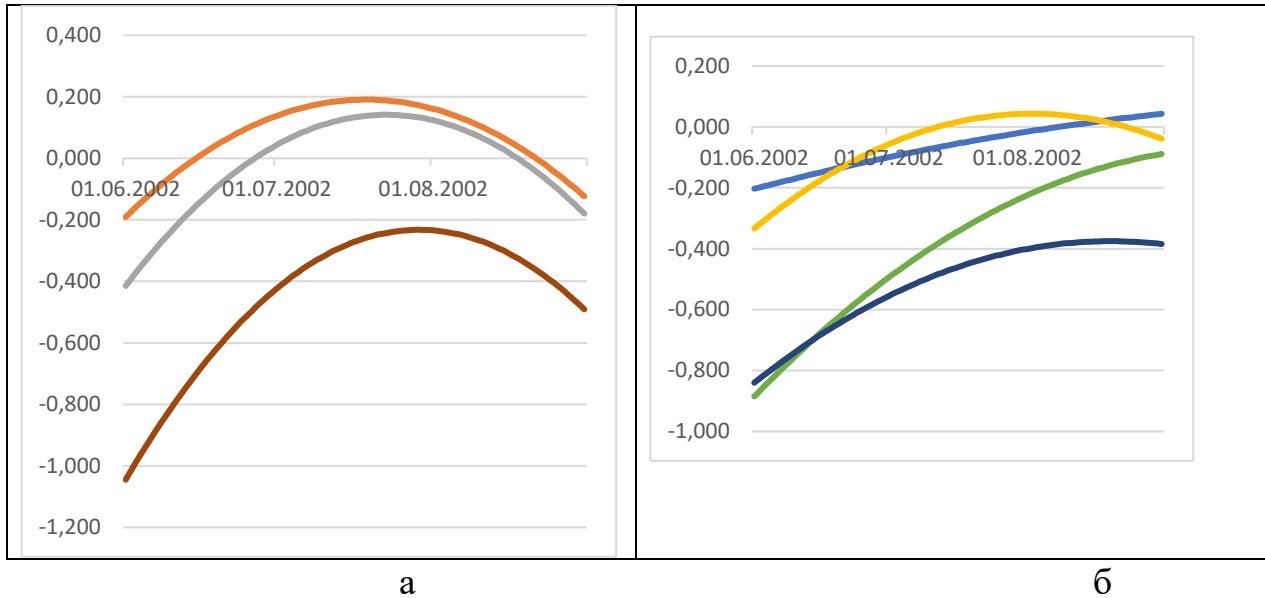


Рисунок 3 – Результати поліноміальної апроксимації літнього мусону за показником КШОЗ: а) роки з очікуваним типом параболи (2003 – рожева лінія, 2004 – зелена лінія, 2009 – коричнева лінія); б) роки з аномальним типом графіку (2002 – блакитна лінія, 2005 – фіолетова лінія, 2007 – жовта лінія, 2008 – синя лінія).

За об'єктивними даними 2002 рік, як рік незвичайної тектонічної активізації Східно-Африканського рифту та екстремальної посухи в Індії [16, 17], у таблиці 3 за 5-ма статистичними показниками з 5-ти сформувався під аномальним впливом КШОЗ. Тобто, 2002 рік чітко виділяється серед усіх досліджених років як рік з максимальною структурною аномальністю сезонної мінливості кутової швидкості обертання Землі. Саме для цього року зафіксовано максимальне значення коефіцієнта А, мінімальним значенням коефіцієнта В, що свідчить про різко порушену симетрію сезонного ходу, максимальним значенням коефіцієнта С, тобто екстремальним зсувом фонового рівня КШОЗ, а також найгіршою якістю поліноміальної апроксимації, що підтверджується максимальними значеннями середньоквадратичного відхилення моделі. Таким чином, 2002 рік відрізняється за всіма статистичними показниками, що дозволяє розглядати його як унікальний випадок глибокої структурної перебудови сезонної мінливості КШОЗ. Цей статистичний висновок узгоджується з незалежними геофізичними спостереженнями, відповідно до яких 2002 рік був роком незвичайної тектонічної активізації Східно-Африканського рифту, а також роком екстремальної посухи в Індії, що свідчить про масштабний характер геодинамічних процесів у цей період.

На другому місці за показником аномальності є 2005 рік (рік глобальної геодинамічної кризи [21]), для якого екстремальні значення зафіксовано за трьома з п'яти статистичних показників (табл. 3). Таким чином, результати факторного аналізу дозволили додатково підтвердити висновки, опубліковані нами у роботах [16, 17] стосовно того, що незвичайні геофізичні умови 2002 і 2005 років вплинули на мусонну циркуляцію опосередковано в результаті аномальної мінливості літнього позитивного екстремуму кутової швидкості обертання Землі у ці роки.

Висновки

В результаті проведених досліджень міжрічної мінливості літнього мусону у Аравійському морі (за факторним аналізом виділяли 2010, 2013, 2015 та 2017 роки), було підтверджено вплив на літній мусонний клімат часових змін кутової швидкості обертання Землі навколо своєї осі у червні-серпні. Отримані результати свідчать, що КШОЗ може розглядатися як геофізичний фактор, здатний впливати на структурні перебудови тропічної зони системи океан-атмосфера в зоні дії літнього Індоканського мусону в Аравійському морі. На відміну від кліматичних індексів (ENSO, IOD), вплив яких на літній

мусон виявився неоднозначним, фактор КШОЗ демонструє здатність формувати як енергетичні, так і структурні міжрічні аномалії літнього мусону Аравійського моря.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність інтеграції фактору КШОЗ у чисельні моделі прогнозування літнього мусону.

З позицій морської логістики, використання інформації про міжрічну та внутрішньосезонну мінливість КШОЗ відкриває можливість завчасної класифікації літніх мусонних сезонів за типом очікуваного хвильового режиму (потужний, слабкий, структурно аномальний). Це, у свою чергу, створює основу для оптимізації сезонного планування перевезень, вибору маршрутів, графіків заходу суден у порти та управління ризиками простою флоту.

ЛІТЕРАТУРА

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 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://courier.unesco.org/ru/articles/indiyskie-mussony-pod-pristalnym-vnimaniem-uchenykh> (дата звернення: 12.01.2026).
7. Максимов І. В. Зміна швидкості обертання Землі та баричне поле північної півкулі Землі. 1973. Т. 210, № 1. С. 67–70.
8. Сидоренков Н. С. Атмосферні процеси та обертання Землі.: Гідрометеоіздат, 2002. 366 с.
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. Соколикіна Е. В. Циркуляція атмосфери синоптичного масштабу в період явища Ель-Ніньо – Південне коливання : автореф. дис. ... канд. геогр. наук., 2004. 24 с.
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 Індокіанською 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 Індокіанською 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. Climate Assessment for 1994–1998 [Електронний ресурс] / U.S. Department of Commerce, National Weather Service, Climate Prediction Center. Режим доступу: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov> (дата звернення: 12.01.2026).
20. Войтенко С. П., Учитель І. Л., Ярошенко В. Н., Капочкін Б. Б. Геодинаміка. Основи кінематичної геодезії. Одеса: Астропринт, 2007. 259 с.
21. Учитель І. Л., Ярошенко В. Н., Капочкін Б. Б. Геодинаміка. Основи динамічної геодезії / под ред. С. П. Войтенко. Одеса: Астропринт, 2008. 311 с.

22. Global Climate Report: 2010 [Електронний ресурс] / NOAA NCEI. Режим доступу: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/201013> (дата звернення: 12.01.2026).
23. 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: 12.01.2026).
24. Deutscher Wetterdienst (DWD) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.dwd.de/> (дата звернення: 12.01.2026).
25. International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://hpiers.obspm.fr/> (дата звернення: 12.01.2026).
26. 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.
27. Бороздич Э. В. Вплив короткоживучих підкіркових локальних збурень на літо-, гідро- та атмосферу. 1990. С. 130–140.
28. 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: 12.01.2026).

REFERENCES

1. Webster, P. J. (1987). The elementary monsoon. In J. Fein & P. Stephens (Eds.), *Monsoons* (pp. 3–32). New York: Wiley.
2. Gadgil, S. (2003). The Indian monsoon and its variability. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 31, 429–467.
3. Krishnamurti, T. N., & Bhalme, H. N. (1976). Oscillations of a monsoon system. Part I: Observational aspects. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 33, 1937–1954.
4. Meehl, G. A. (1987). The annual cycle and interannual variability in the tropical Pacific and Indian Ocean regions. *Monthly Weather Review*, 115, 27–50.
5. Gill, A. E. (1980). Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106, 447–462.
6. Indian monsoons under close scrutiny of scientists. (n.d.). Retrieved September 12, 2024, from <https://courier.unesco.org/ru/articles/indiyskie-mussony-pod-pristalnym-vnimaniem-uchenykh>
7. Maksimov, I. V. (1973). Zmina shvydkosti obertannia Zemli ta barychne pole pivnichnoi pivkuli Zemli [Changes in Earth's rotation rate and the baric field of the Northern Hemisphere]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 210(1), 67–70.
8. Sidorenkov, N. S. (2002). Atmosferni protsesy ta obertannia Zemli [Atmospheric processes and Earth rotation]. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat. 366 p.
9. Sidorenkov, N. S., & Sumerova, K. A. (2012). Heodynamichni prychny dekadnykh zmin klimatu [Geodynamic causes of decadal climate variability]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 348, 195–214.
10. Wang, B. (2006). *The Asian monsoon*. Berlin: Springer. 787 p.
11. Holton, J. R. (2004). *An introduction to dynamic meteorology* (4th ed.). Amsterdam: Elsevier. 535 p.
12. Sokolyhina, E. V. (2004). Tsyrukuliatsiia atmosfery synoptychnoho masshtabu v period yavlyshcha El-Nino – Pivdenne kolyvannia [Atmospheric circulation at synoptic scale during ENSO] (Extended abstract of candidate's thesis). 24 p.
13. Lambeck, K. (1980). *The Earth's variable rotation: Geophysical causes and consequences*. Cambridge: Cambridge University Press. 449 p.
14. Hager, B. H., Clayton, R. W., Richards, M. A., et al. (1985). Lower mantle heterogeneity, dynamic topography and the geoid. *Nature*, 313, 541–545.
15. Schott, F. A., & McCreary, J. P. (2001). The monsoon circulation of the Indian Ocean. *Progress in Oceanography*, 51, 1–123.
16. Kucherenko, N. V., Tomchakovskiy, H. H., Kapochkina, M. B., & Kalinichenko, Ye. V. (2025). Umovy formuvannia musonnoho vitru nad Indookeanskoiu anomalieiu syly tiazhinnia [Conditions of monsoon wind formation over the Indian Ocean gravity anomaly]. *Vodnyi transport*, 1(42), 115–130. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42>

17. Tomchakovskiy, H. H., & Kapochkina, M. B. (2025). Rezultaty doslidzhennia prychnyn musonnoho vitru nad Indookeanskoiu anomalieiu syly tiazhinnia [Results of studying the causes of monsoon wind]. *Vodnyi transport*, 2(43), 57–74. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.05>
18. Blewitt, G., Lavallée, D., Clarke, P., & Nurutdinov, K. (2001). A new global mode of Earth deformation: Seasonal cycle detected. *Science*, 294(5550), 2342–2345. <https://doi.org/10.1126/science.1065328>
19. U.S. Department of Commerce, National Weather Service, Climate Prediction Center. (n.d.). Climate assessment for 1994–1998. Retrieved September 12, 2024, from <https://www.cpc.ncep.noaa.gov>
20. Voitenko, S. P., Uchytel, I. L., Yaroshenko, V. N., & Kapochkin, B. B. (2007). *Heodynamika. Osnovy kinematychnoi heodezii* [Geodynamics: Fundamentals of kinematic geodesy]. Odesa: Astroprint. 259 p.
21. Uchytel, I. L., Yaroshenko, V. N., & Kapochkin, B. B. (2008). *Heodynamika. Osnovy dynamichnoi heodezii* [Geodynamics: Fundamentals of dynamic geodesy]. Odesa: Astroprint. 311 p.
22. NOAA NCEI. (n.d.). Global climate report: 2010. Retrieved September 12, 2024, from <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/201013>
23. El Niño and the record years 1998 and 2016. (2017). Retrieved September 12, 2024, from <https://www.realclimate.org/index.php/archives/2017/11/el-nino-and-the-record-years-1998-and-2016/>
24. Deutscher Wetterdienst (DWD). (n.d.). Retrieved September 12, 2024, from <https://www.dwd.de/>
25. International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). (n.d.). Retrieved September 12, 2024, from <https://hpiers.obspm.fr/>
26. Tomchakovskiy, H. H., Kapochkina, M. B., & Kalinichenko, Ye. V. (2025). Doslidzhennia minlyvosti “musonnoi depresii” u Benhalskii zatozi [Study of variability of the monsoon depression in the Bay of Bengal]. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky*, 51, 250–262. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344961>
27. Borozdych, E. V. (1990). Vplyv korotkozhyvuchykh pidkirkovykh lokalnykh zburien na lito-, hidro- ta atmosferu [Influence of short-lived subcrustal disturbances on lithosphere, hydrosphere and atmosphere]. 130–140.
28. Kolesnyk, A. V., Dolia, V. D., & Kucherenko, N. V. (2015). Vykorystannia HIS dlia vyvchennia prychnyn formuvannia musoniv Indiiskoho okeanu [Use of GIS to study monsoon formation]. *Chasopys kartohrafiï*, 12, 82–89. Retrieved September 12, 2024, from http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh_2015_12_11

Tomchakovskiy G., Kucherenko N., Kapochkina M.

THE INTERANNUAL VARIABILITY OF THE SUMMER MONSOON IN THE ARABIAN SEA (FACTOR ANALYSIS)

The paper analyzes the features of the interannual variability of surface waves in the area of action of the summer Indian Ocean monsoon in the period 2010–2017 in the context of the tasks of maritime logistics and navigation safety. The study is based on the generalization of long-term observation series, which made it possible to identify the regularities of the formation of the wave regime in different years and assess the degree of its variability. Based on statistical analysis, it is shown that anomalous wave regimes can be formed both in the form of an increased integral intensity of the process and in the form of seasonal dynamics without pronounced extreme manifestations. This indicates the complex nature of interannual variability, which is not always manifested through obvious storm events, but can significantly affect the general conditions of navigation.

It is established that classical climate indices, in particular ENSO and the Indian Ocean Dipole, do not provide an unambiguous explanation of the actual differences in the wave regime of the Arabian Sea in the indicated years. This indicates the need to expand existing approaches to the interpretation of climate processes and take into account additional factors. To identify the causes of anomalous manifestations of monsoon circulation, the feasibility of including geophysical processes in the well-known list of influential weather-forming factors has been substantiated. As a result of the factor analysis of the interannual variability of the summer monsoon by 4 characteristics (2010, 2013, 2015 and 2017 were highlighted), the influence of the variability of the Earth's angular velocity on the summer monsoon of the Arabian Sea was confirmed at the quantitative level. The dependencies which were formed as the result of the given analyses provide a deeper

understanding of the mechanisms of wave regime formation and clarify the role of global geophysical processes in the dynamics of monsoon circulation.

The results obtained can be used to increase the reliability of forecasting wave conditions of the summer monsoon, optimize the planning of maritime transportation and reduce risks for shipping in the Arabian Sea. The practical significance of the study lies in the possibility of taking into account the identified patterns when developing forecasting models and making management decisions in the field of maritime logistics.

Keywords: *maritime safety; summer Indian Ocean monsoon; surface turbulence; interannual monsoon variability; ENSO; Indo-Ocean Dipole; geophysical factors.*

Стаття прийнята 01.02.2026