

ДОСЛІДЖЕННЯ МІНЛИВОСТІ «МУСОННОЇ ДЕПРЕСІЇ» У БЕНГАЛЬСЬКІЙ ЗАТОЦІ

Томчаковський Г.Г.*ст. викладач, аспірант, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9799-4368>, e-mail: gromchakovsky@gmail.com;***Капочкіна М.Б.***канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4893-2523>, e-mail: kapochkinamargarita@gmail.com;***Калініченко Є.В.***канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-7313>, e-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com*

Мусонні депресії (МД), як області зниженого тиску, що формуються над акваторією Бенгальської затоки, мають значний вплив на погодні умови в період літнього мусону. Вони характеризуються штормовим вітром, високими хвилями, інтенсивною хмарністю і сильними дощами, становлячи небезпеку для морського судноплавства та берегової інфраструктури в регіоні. Часова мінливість МД характеризується істотними змінами у широкому діапазоні масштабів – від між річного до внутрішньомісячного. Розуміння причин, що контролюють мінливість режиму МД, необхідне для зниження ризиків і втрат у секторі морського транспорту, що відіграє ключову роль в світовій економіці. Досліджено МД Біскайської затоки двох типів, у тому числі з радіусом до 2 тис. км. Показано, що обидва типи МД за сприятливих умов однаково трансформуються у тропічний циклон. Визначено, що утворення МД у Біскайській затоці не сприяють сталому розвитку літньої мусонної циркуляції. Визначено, що утворення МД під час літнього мусону є типовим лише для Біскайської затоки. Така відмінність пов'язана з особливими умовами у привідній атмосфері, що виникають завдяки конвекційній нестійкості над розпрісненими зонами океану в дельтах річок. Вперше встановлено, що МД у Біскайській затоці утворюються циклічно, тобто під впливом певних умов. Час утворення МД співпадає з тимчасовим зменшенням відцентрової сили в умовах зменшення кутової швидкості обертання Землі навколо своєї вісі. Це підтверджено фактом припинення циклічного утворення МД у Біскайській затоці під час локального зростання кутової швидкості обертання Землі в умовах літнього сонцестояння. Отримані результати створюють основу для поліпшення якості прогнозів погодних умов на морських шляхах у північній частині Індійського океану та оптимізації стратегій мінімізації погодних ризиків для морської галузі.

Ключові слова: мусонна депресія, мусонний клімат, судноплавство, внутрішньотропічна зона конвергенції, морська навігація, солоність океану.

Постановка проблеми

Мусонні депресії (МД) над акваторією Бенгальської затоки – характерний елемент літньої мусонної циркуляції атмосфери регіонального масштабу. МД супроводжуються штормовими вітрами і високими хвилями, що створює загрозу для безпеки морського судноплавства на шляхах, що зв'язують порти Індії, Бангладеш, М'янми і Шрі-Ланки. Траєкторії МД проходять через основні судноплавні шляхи, тому інформація про їхнє переміщення та інтенсивність критично важлива для планування маршрутів і термінів морських перевезень.

Повторюваність МД у часі схильна до значних між річних коливань. В окремі роки над Бенгальською затокою може формуватися до 10-12 МД за сезон, тоді як в інші роки їхня кількість скорочується до 1-2. Крім цього, частота МД зазнає помітних змін у масштабі десятиліть. Так, в останній чверті XX століття відзначалася тенденція до зменшення кількості МД [1], а на початку XXI століття фіксується активізація МД (до 7-8 МД за сезон [2]).

До числа основних предикторів МД над Бенгальською затокою відносяться температура поверхні океану, відносна завихоренність і збіжність потоків у нижній тропосфері, величина вертикального зсуву вітру і

запаси прихованого тепла в атмосфері [3, 4]. Інші дослідження вказують на тісний зв'язок формування МД із коливаннями інтенсивності та зсувами внутрішньотропічної зони конвергенції (ВЗК) [5]. Так, активізація ВЗК та її поширення на північ від середнього літнього положення зазвичай супроводжуються збільшенням кількості випадків циклогенезу і посиленням вітрохвильової активності над акваторією Бенгальської затоки. І навпаки, ослаблення ВЗК призводить до зменшення повторюваності МД і поліпшення погодних умов для судноплавства.

Кількісна оцінка факторів, що визначають мінливість мусонних депресій на різних часових масштабах, видається надзвичайно важливою в контексті їхнього впливу на погодні ризики для морського транспорту в Бенгальській затоці. Бенгальська затока і прилеглі райони Індійського океану відрізняються високою інтенсивністю судноплавства. Порти Індії, Бангладеш і Шрі-Ланки обробляють понад 1 млн TEU (20-футових контейнерних еквівалентів) на рік. На морський транспорт припадає близько 95% обсягу зовнішньої торгівлі Індії. У зв'язку з цим аномалії вітрохвильової активності та видимості, пов'язані з проходженням МД, можуть призводити до серйозних порушень у роботі портів і затримок у морських перевезеннях. Щорічні

економічні втрати через несприятливі погодні умови для світового судноплавства оцінюються в 0,1-0,2% глобального ВВП. Для регіону Індійського океану цей показник може бути істотно вищим з урахуванням високої повторюваності МД. Більш чітке розуміння предикторів циклогенезу над Бенгальською затокою може сприяти підвищенню точності та завчасності прогнозів переміщення МД і поліпшенню логістики у регіоні. Це, своєю чергою, дасть змогу зменшити економічні втрати та ризики для морського транспорту, пов'язані з впливом небезпечних погодних явищ.

Мета статті

Метою даної роботи є визначення чинників, що визначають мінливість мусонних депресій на між річному і внутрішньо місячному часових масштабах. У Індоеокеанському регіоні зазвичай наприкінці квітня – на початку травня приземна температура досягає річного максимуму (перевищує 40°C); при цьому температура поверхні моря (SST) перевищує 30°C на більшій частині північної частини Індійського океану. Так триває до червня. З початком літнього мусону південно-західні вітри приносять у прибережні райони насичене вологою повітря та сильні дощі.

Загальновідомо, що мусонний клімат Бенгальської затоки відрізняється від мусонного клімату Аравійського моря за рахунок того, що у Бенгальській затоці річковий стік суттєво вищий, ніж у Аравійському морі (рис. 1).

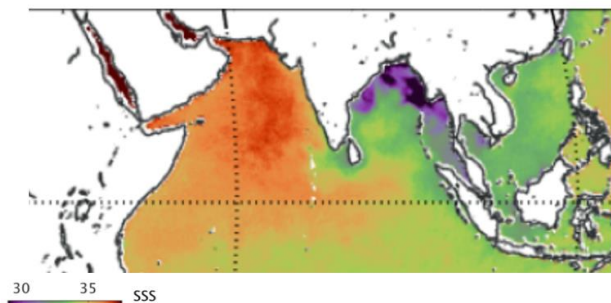


Рис. 1 – Карта-схема солоності поверхневих вод Індійського океану [6]

У північно-центральної частині Бенгальської затоки значна кількість прісної води з опадів і річок створює неглибокий поверхневий шар води з низькою солоністю [7, 8], який перекриває під поверхневі теплі та солоні води [9-11]. Солоність поверхневого шару Бенгальської затоки іноді може бути нижчою на 25% [12], що значно підвищує випаровування з поверхні океану, зменшує вагу приводного повітря і, відповідно, зменшує атмосферний тиск над акваторією.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Мусонна депресія – один із ключових елементів літньої мусонної циркуляції над Бенгальською

затокою у Індійському океані. На рис. 2 показано траєкторії руху МД та циклонів у червні-вересні у 1980-2009 роках.

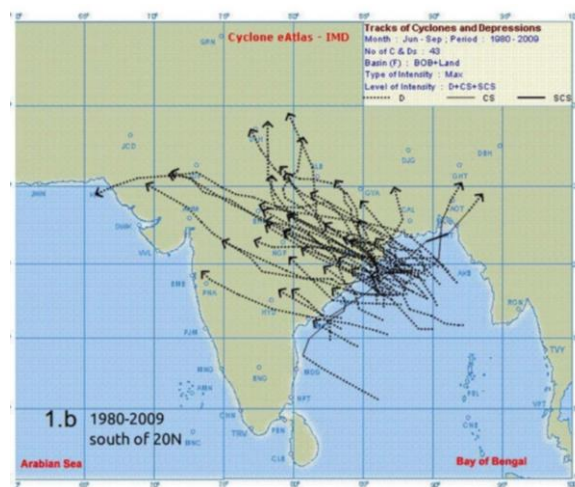


Рис. 2 – Треки мусонних депресій з електронного атласу циклонів IMD, що датуються періодом 1980-2009 років. Цифри та відповідна статистика були отримані за допомогою онлайн-атласу циклонів Індійського метеорологічного департаменту [13]

Важливо констатувати, що у розумінні авторів публікації [13] МД – це локальні конвективні комірки, з яких іноді, за певних умов, формуються тропічні циклони. Виникнувши над теплими водами Бенгальської затоки МД такого типу заповнюються над Індійським субконтинентом. Тривалість життєвого циклу типової МД становить від 3 до 6 діб [14]. Слід зазначити, що тропічні циклони Бенгальської затоки мають типові траєкторії, що відповідають схемі, наведеній на карті (рис. 2). У період літнього мусону над Аравійським морем та (у меншій мірі) над Бенгальською затокою спостерігається вертикальний зсув вітру, що перешкоджає утворенню тропічних циклонів [15].

У нашому розумінні МД – це синоптичні утворення в нижній тропосфері з характерними горизонтальними розмірами до 2000 км. Зародження МД над водами Бенгальської затоки відбувається за поєднання низки сприятливих чинників, до яких відносять позитивні аномалії температури поверхні океану, підвищений вологовміст повітря.

Розвиток і підтримання МД протягом кількох днів над водами Бенгальської затоки пов'язують з бароклінно-баротропною нестійкістю і умовною нестійкістю 2-го роду [16]. Вертикальна структура МД характеризується наявністю холодного ядра на нижніх рівнях тропосфери і теплового ядра на верхніх рівнях (500 – 300 гПа). Висхідні рухи в циркуляції МД зазвичай простежуються до рівня 300 гПа [4]. Характерне значення добових опадів, пов'язаних із МД, становить 30-50 см. Просторовий розподіл опадів, пов'язаних з МД, дуже неоднорідний [17]. На рис. 3 наведено карту середньої

щодобової кількості опадів у період літнього мусону [18].

На схемі показано, що просторове положення районів аномальних опадів у Бенгальській затоці не відповідає траєкторії руху МД, наведеної на рис. 2, і співпадає з районом максимального випаровування над розпіненими поверхневими водами на північному сході Бенгальської затоки (рис. 1). Найголовнішим є те, що як у Бенгальській затоці, так і у Аравійському морі райони максимальних опадів співпадають з виходом на суходіл літнього мусонного вітру південно-західного напрямку.

Розглянемо між річну мінливість МД [18]. На рис. 4 показано зміни у часі інтенсивності МД за різними ознаками.

Приблизно у 1980 році активність МД системно знизилася. Після цього активізація МД зафіксована у 1996-1997 роках та у 2005-2007 роках.

В роботах [19, 20] розглянуто внутрішню місячну мінливість МД над акваторією Бенгальської затоки, вказано на вплив процесів, що формують внутрішньотропічну конвергенцію на інтенсивність МД. Частота формування та інтенсифікації МД схильні до значних внутрішньомісячних коливань, проявлених зміною активних і перервних фаз літнього мусону над Індією.

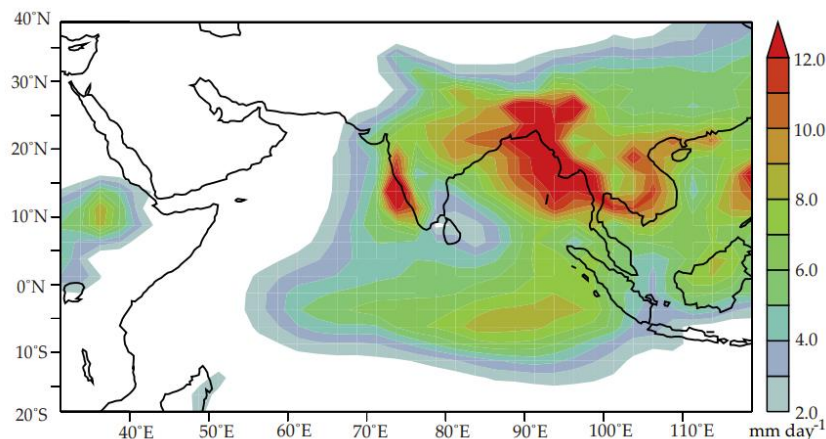


Рис. 3 – Середня кількість опадів (мм/день) у період літнього мусону (червень-вересень) [18]

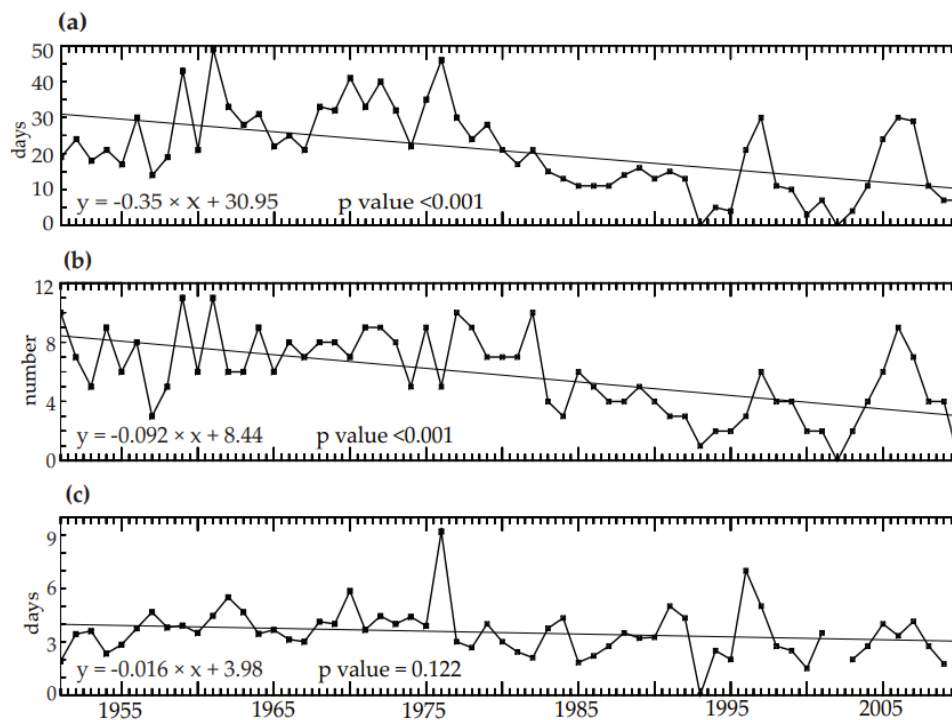


Рис. 4 – Статистичні дані річної кількості МД: (а) кількості днів, (б) кількості, (с) середньої тривалості життя (у днях) [18]

Виклад основного матеріалу

В результаті узагальнення результатів дослідження процесів утворення МД у Бенгальській затоці було визначено, що 2018 рік виявився аномальним за чисельністю МД (6 одиниць) та тропічних циклонів (ТЦ) (7 одиниць) [21]. У 2018 році, в термін дії літнього мусону, тропічні депресії були зафіксовані 28 травня, 10 червня, 20 липня, 7, 15 серпня, 6 вересня. Всі МД мали локальний просторовий масштаб і сформувалися над розпрісненими прибережними водами північного узбережжя Бенгальської затоки. Кліматичні особливості тропічного циклогенезу в умовах мусонного клімату нами розглянуті у монографії [22].

На рис. 5 наведено графік утворення тропічних циклонів, які мають відповідну назву, і МД (тропічних депресій), що ідентифікуються аббревіатурою BOB і

відповідним номером. На рисунку показано, що наприкінці травня, коли температура морської поверхні перевищила 30 градусів, а мусонний вертикальний зсув вітру ще не розвинувся, з МД утворилися ТЦ «Сангар» та «Макуну». У подальшому, за появи вертикального зсуву вітру, у Бенгальській затоці утворилося 6 депресій, що нетипово для району мусонної циркуляції у Аравійському морі. Як тільки мусонна циркуляція припинилася, у Бенгальській затоці з МД почали утворюватися ТЦ «Дайє», «Лубан» та «Тітлі». Навіть в листопаді та грудні 2018 р. у Бенгальській затоці утворилися ТЦ «Гаджа» та «Петай».

На рис. 6 наведено карти-схеми тропічних депресій у Індоканському регіоні під час літнього мусону у 2018 році: а) 29.05.2018; б) 10.06.2018; в) 21.07.2018; г) 07.08.2018; д) 15.08.2018; е) 06.09.2018 [21].

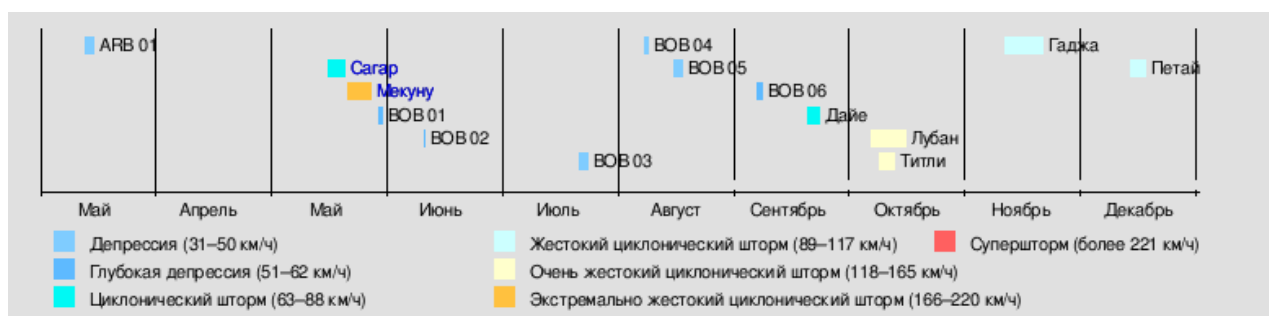


Рис. 5 – Схема-графік тропічного циклогенезу у Індоканському регіоні у 2018 році [21]

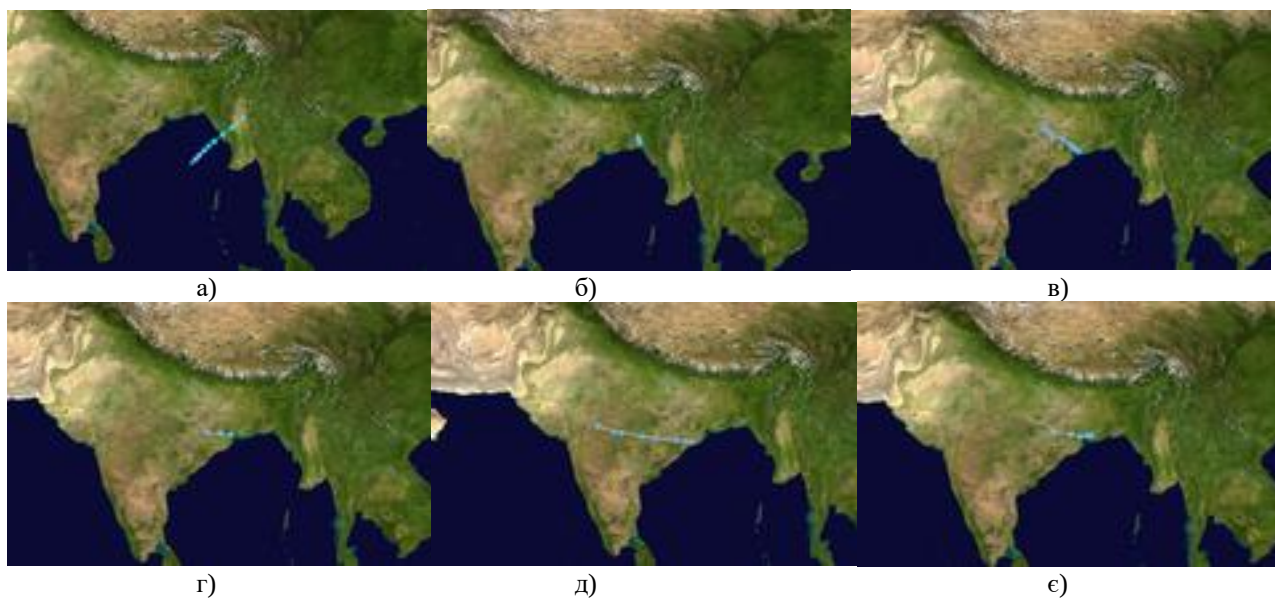


Рис. 6 – Карты - схемы тропічних депресій у Індоканському регіоні під час літнього мусону у 2018 році а) 29.05.2018 б) 10.06.2018 в) 21.07.2018 г) 07.08.2018 д) 15.08.2018 е) 06.09.2018 [21]

Важливо констатувати, що всі шість тропічних депресій виникли в розпрісненому районі Бенгальської затоки, де формується зона позитивної аномалії потенційної енергії конвекції в тропосфері. Характеристики депресій BOB01- BOB06 наведені у таблиці.

Таблиця
Характеристики депресій BOB01- BOB06 [23]

Назва тропічної депресії	Дата утворення	Швидкість вітру (км/годину)	Атмосферний тиск гПа
BOB01	29.05.2018	55 км/ч	990 гПа
BOB02	10.06.2018	45 км/ч	989 гПа
BOB03	21.07.2018	45 км/ч	989 гПа
BOB04	07.08.2018	45 км/ч	992 гПа
BOB05	15.08.2018	45 км/ч	994 гПа
BOB06	06.09.2018	55 км/ч	990 гПа

Відповідно до результатів наших досліджень стосовно впливу щорічної аномалії кутової швидкості обертання Землі у червні-серпні на виникнення мусонної циркуляції у Аравійському морі, нами проведено аналогію з Бенгальською затокою. На рис. 7 наведено графік змін у часі кутової швидкості обертання Землі навколо своєї осі у травні-вересні 2018 р. (стрілками показано дати виникнення в Бенгальській затоці МД BOB01 - BOB06).

Відповідно до графіку, наведеного на рис. 7, час утворення тропічних депресій співпадає з умовами мінімальної швидкості обертання Землі навколо своєї осі. За час існування літнього мусону у 2018 році зафіксовано 6 тропічних депресій і 8 епізодів зниження кутової швидкості Землі. Важливо відмітити, що в умовах річного позитивного екстремума швидкості обертання Землі навколо своєї осі, тобто в період часу з середини червня по середину липня, МД в дати мінімальної швидкості обертання Землі навколо своєї осі, тобто 22 червня і 11 липня, не заформувалися. Отримані результати співпадають з результатами наших досліджень стосовно того, що за умов зменшення швидкості обертання Землі відбувається зменшення інтенсивності мусонної циркуляції і, відповідно, зменшення зсуву вітру по висоті.

Слід зауважити, що під терміном МД одночасно розуміють як локальні тропічні депресії, так і великомасштабні синоптичні циклонічні утворення діаметром майже 2000 км. Такі ТЦ зазвичай формуються в екваторіальній зоні і на кінцевій стадії часто трансформуються у звичайні ТЦ. Цей процес нами вперше було розглянуто у монографії [22], у тому числі екваторіальний циклон Бенгальської затоки діаметром порядку 2000 км 25.11.2011 р., який перетворився у тропічний шторм 05A (атмосферний тиск 998 гПа, швидкість вітру 55 км/годину). ТЦ був пов'язаний із сильними дощами, які спричинили 19 смертей та пошкодили 5700 будинків.

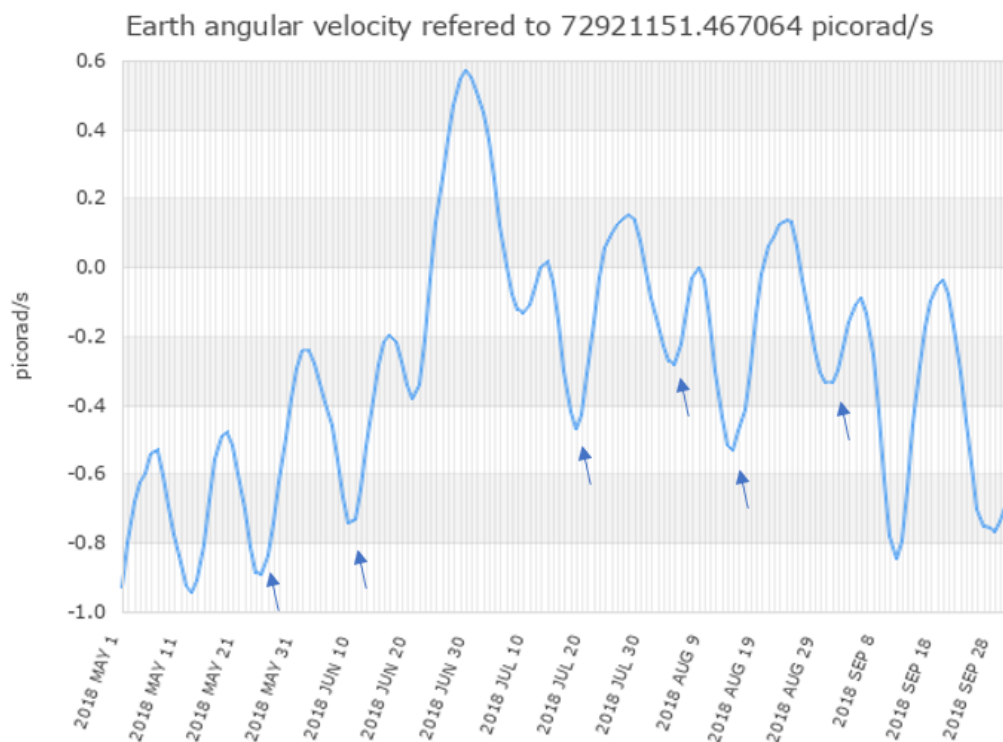
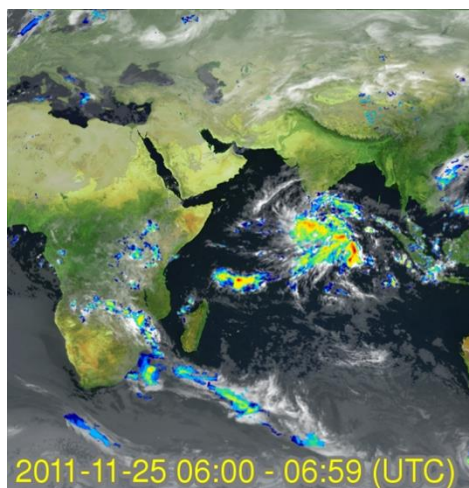
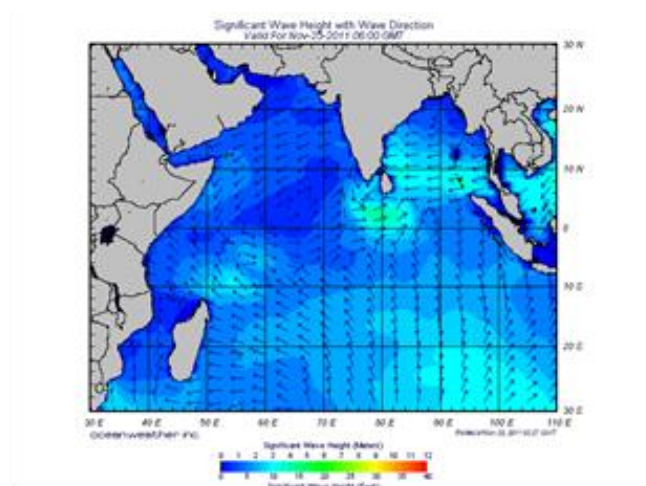


Рис. 7 – Графік змін у часі кутової швидкості обертання Землі навколо своєї осі у травні-вересні 2018 р. (стрілками показано дати виникнення в Бенгальській затоці тропічних депресій BOB01 - BOB06) [23]



а)



б)



в)

Рис. 8 – а) ІЧ та РЛ зображення циклону в Індійському океані 25.11.2011 р. [24] б) Карта: висоти і напрямку вітрових хвиль у Індійському океані 25.11.2011 р. о 9:00 за ГРН [25], в) фото тропічного шторму 27.11.2011 р.

На рисунку 8 показано, що в районі екватору в центрі МД за умов циклонічної циркуляції (проти часової стрілки) висота вітрових хвиль досягала 6-7 м. Завдяки тому, що з 6 по 20 червня 2018 року погодні умови у Бенгальській затоці були досліджені (програма MISO-BoB 2018) і опубліковані [26], ми виконали додаткові дослідження внутрішньо місячної мінливості літнього мусону у Індійському океані саме у червні 2018 р. за результатами емпіричних досліджень, виконаних за участю Індії, Шрі-Ланки та наукового підрозділу ВМС США за участю корабля R/V Thompson США, авторами дослідження [26] у Бенгальській затоці визначено часовий проміжок 9-12.06.2018 р., як прояв активного мусону, а 16-19.06.2018 р., як прояв тимчасового припинення мусонної циркуляції. На рис. 9 надано інформацію про атмосферні умови у приводному шарі затоки (температурні аномалії та вітрові умови під час активного мусону (9-12 червня) та під час тимчасового припинення мусонної циркуляції у Бенгальській затоці (16-19 червня)

(с) та (d), відповідно. Контурні лінії надають інформацію про район і інтенсивність опадів.

Відповідно до наведених карт, мусонна циркуляція у вигляді південно-західного вітру починається на початку червня, досягає потужності звичайного рівня 10 червня, а потім 16-19 червня з незрозумілих причин блокується. За рахунок блокування мусонної циркуляції у Бенгальській затоці тимчасово відновлюються пасатні вітри західного напрямку.

Розглянемо зміни у часі швидкості та напрямку вітру у центральній частині Бенгальської затоки 5-20 червня 2018 року (рис. 10).

На рис. 9 показано, що на висоті ізобари 600 гПа літній мусон характеризується швидкістю вітру приблизно 20 м/с, а у приводному шарі лише до 15 м/с. Під час блокування літнього мусону на висоті ізобари 600 гПа швидкість вітру знижується до 2-3 м/с і змінюється його напрямок, хоча у приводному шарі швидкість вітру залишається на рівні 7-8 м/с без суттєвої зміни напрямку.

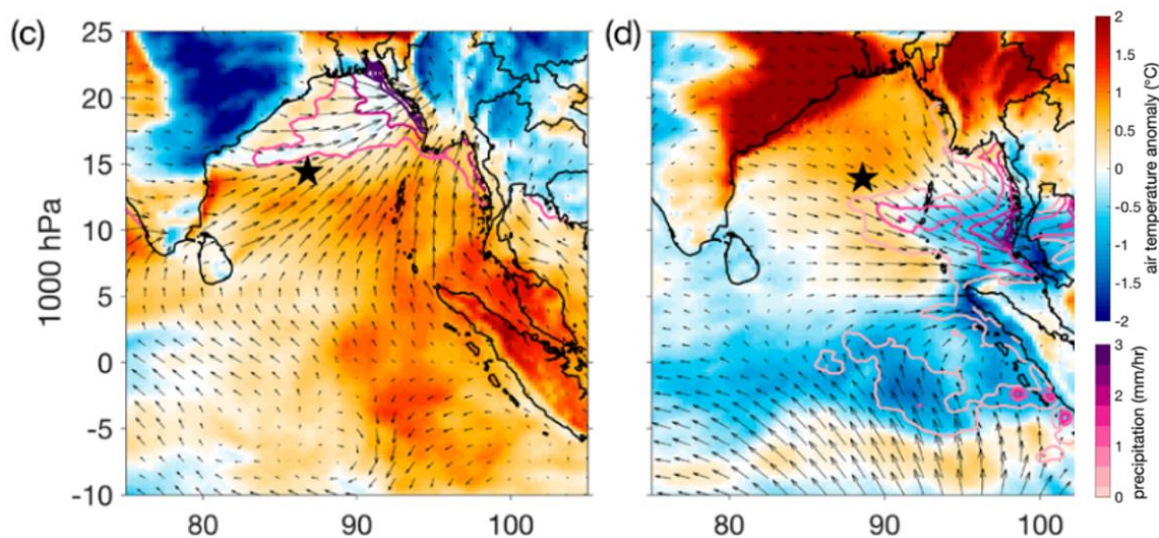


Рис. 9 – Атмосферні умови у приводному шарі затоки (температурні аномалії та вітрові умови під час активного мусону (9-12 червня) та під час тимчасового припинення мусонної циркуляції у Бенгальській затоці (16-19 червня) (с) та (d), відповідно [26])

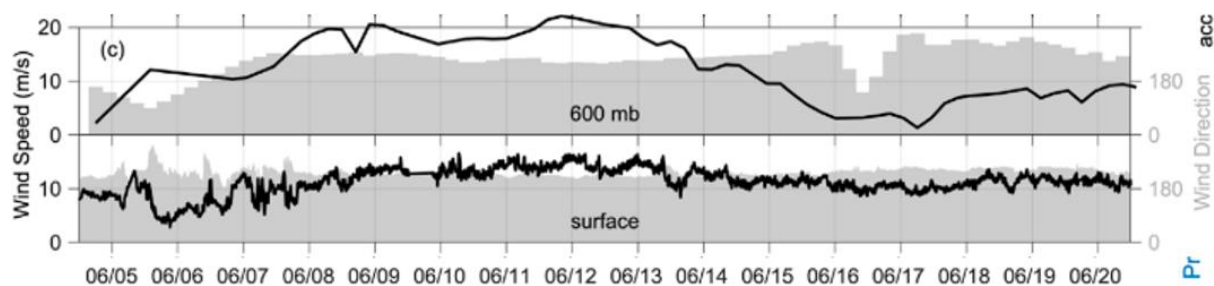


Рис. 10 – Часові зміни (с) швидкості вітру (чорний, LHS) і напрямку (сірий, RHS) (внизу) біля поверхні та (вгорі) на 600 гПа [26])

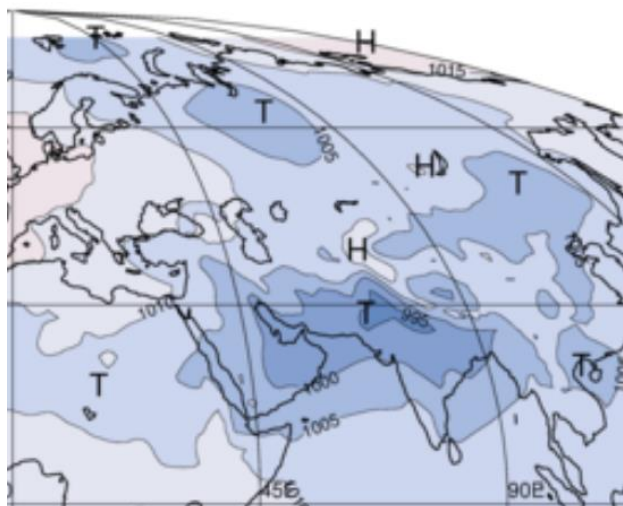
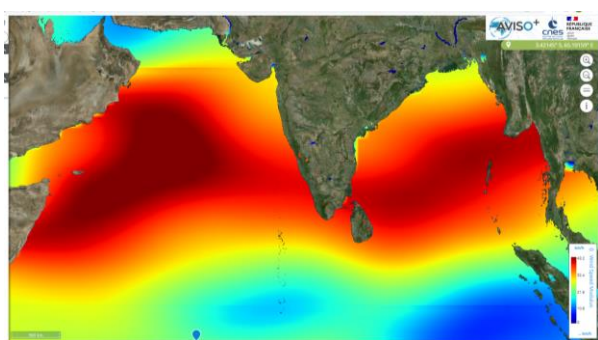
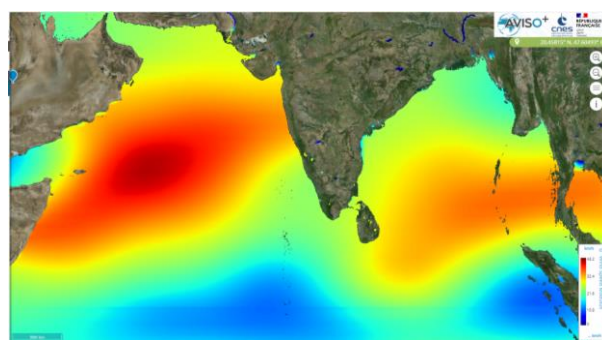


Рис. 11 – Фрагмент карти приземного атмосферного тиску в червні 2018 р. [27]



а)



б)

Рис. 12 – Карты швидкості вітру у Індокоеанському регіоні: а) 10.06.2018; б) 17.06.2018 р. [28]

Нами на рис. 11 наведено карту приземного атмосферного тиску, осередненого за червень 2018 року. За осередненими даними, у червні 2018 року над Біскайською затокою було зафіксовано малоградієнтне баричне поле, що має формувати південно-західний вітер, як це показано на рис. 4а. Можна відмітити, що градієнти атмосферного тиску у приводному шарі Біскайської затоки приблизно вдвічі менші, ніж у Аравійському морі. Важливою інформацією є і те, що в районі утворення тропічних депресій на півночі Бенгальської затоки, атмосферний тиск у приводному шарі був нижчий за 1000гПа, тобто в кордонах тропічних депресій ВОВ02-ВОВ06 від'ємна аномалія атмосферного тиску коливалася в межах 4-8 гПа.

Нами виконано порівняльний аналіз вітрових умов 10.06.2018 в Аравійському морі та у Бенгальській затоці, коли мусонний вітер був вже сформованим у фазу блокування літнього мусону 17.06.2018 р. (рис. 12).

На рис. 12 можна побачити, що мусонна циркуляція Індокоеанського регіону, як прояв у тропосфері

південно-західних вітрів, проявлена двома окремими, ізольованими один від одного, локалізованими в кордонах Аравійського моря та Бенгальської затоки зонами посилення швидкості вітру з екстремумами в центральних районах Аравійського моря та Біскайської затоки. Тобто, структури в тропічній тропосфері, що мають синоптичний масштаб, існують окремо в Аравійському морі та Біскайській затоці, хоча генеруються спільно загальним погодоутворюючим фактором, бо починаються і закінчуються синхронізовано, а за нашими спостереженнями активізуються і послаблюються – також синхронізовано.

Розглянемо розбіжності літнього мусону у Аравійському морі та Біскайській затоці.

На рисунках 13, 14 наведено інформацію стосовно часових змін максимальної швидкості вітру та максимальної висоти вітрових хвиль у Аравійському морі і Бенгальській затоці у червні 2018 року під час виконання наукової програми MISO-BoB 2018.

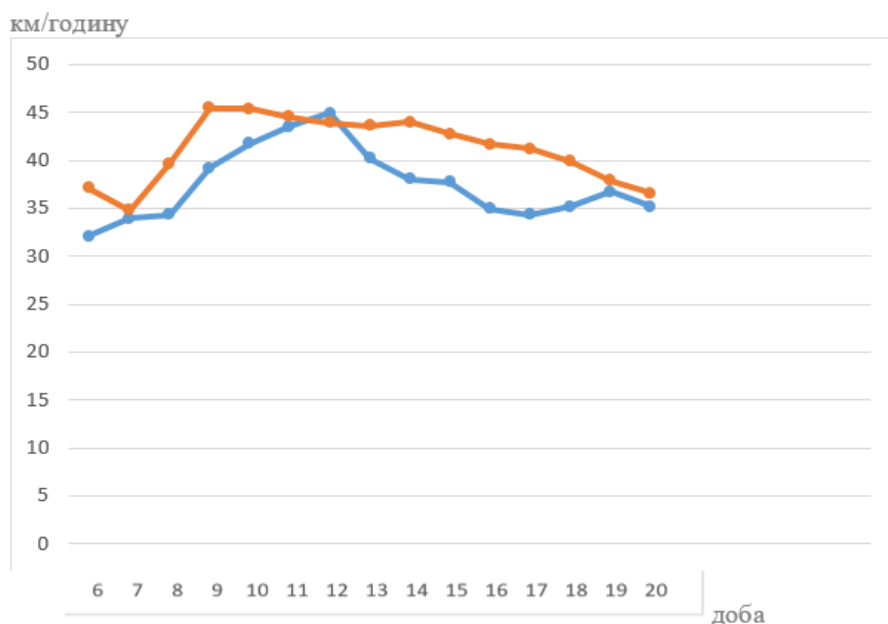


Рис. 13 – Зміни у часі максимальної швидкості вітру у Аравійському морі (помаранчевий) та Бенгальській затоці (синій).

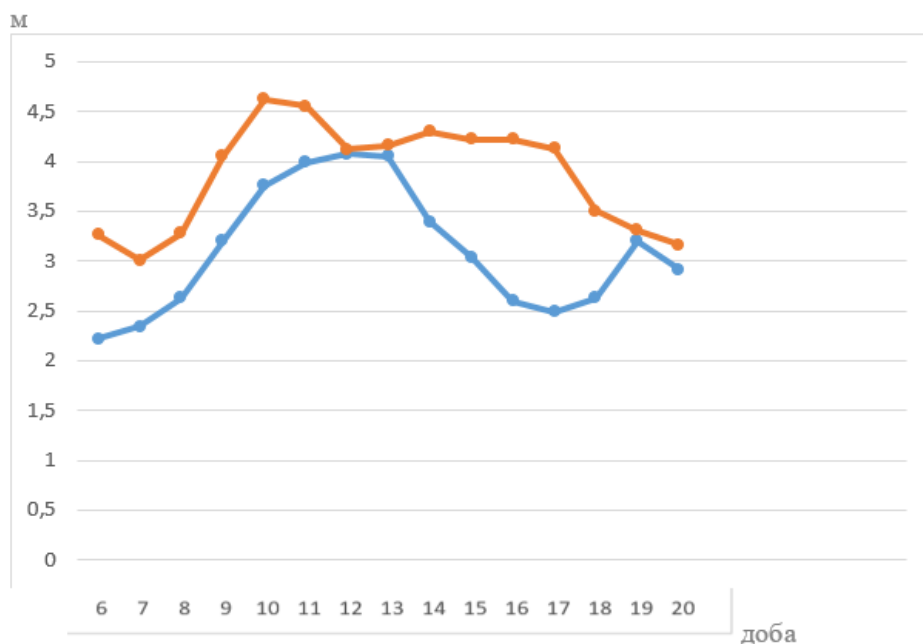


Рис. 14 – Зміни у часі максимальної висоти вітрових хвиль у Аравійському морі (помаранчевий) та Бенгальській затоці (синій)

За даними часових змін показника позитивного екстремуму швидкості вітру у Аравійському морі і Бенгальській затоці можна зробити висновок, що у Аравійському морі протягом всього часу цей показник приблизно на 5 км/годину вищий, ніж над Біскайською затокою, а дисперсія нижча. Це свідчить про те, що погоду утворюючі фактори, що епізодично блокують літній мусон, найбільш виражені у Біскайській затоці.

Можливо, з цієї причини термін «мусонна депресія» стосується синоптичних утворень саме Біскайської затоки.

Поверхнєве хвилювання, як більш надійний показник ефективності мусонної циркуляції, що фіксується супутниковими альтиметричними системами, факт відсутності кореляції між змінами інтенсивності мусонної циркуляції після початку дії вітрів, що зафіксовано

у першій декаді червня. За ознакою поверхневого хвилювання, у порівнянні з оцінкою швидкості вітру, активність літнього мусону у Аравійському морі у порівнянні з Біскайською затокою ще більша, бо висота хвиль більша на 1.0-1.5 м.

На рис. 15 наведено результати вимірювань, проведених у центральній частині Біскайської затоки під час виконання програми програма MISO-BoB 2018. Це тепловий потік сонячного випромінювання, температура поверхні океану, вертикальний розподіл

температури та солоності морської води. На графіках можна побачити, що 13 червня, у дату початку процесу блокування мусонної циркуляції у Бенгальській затоці, хмарність почала зменшуватися, хоча це більше підходить не для причини, а як наслідок процесу припинення мусонного вітру. У зазначену дату показник температури поверхневого шару води, як і води до глибини 40 м у центральній частині Бенгальської затоки, був без змін. Інша ситуація спостерігається у змінах солоності морської води.

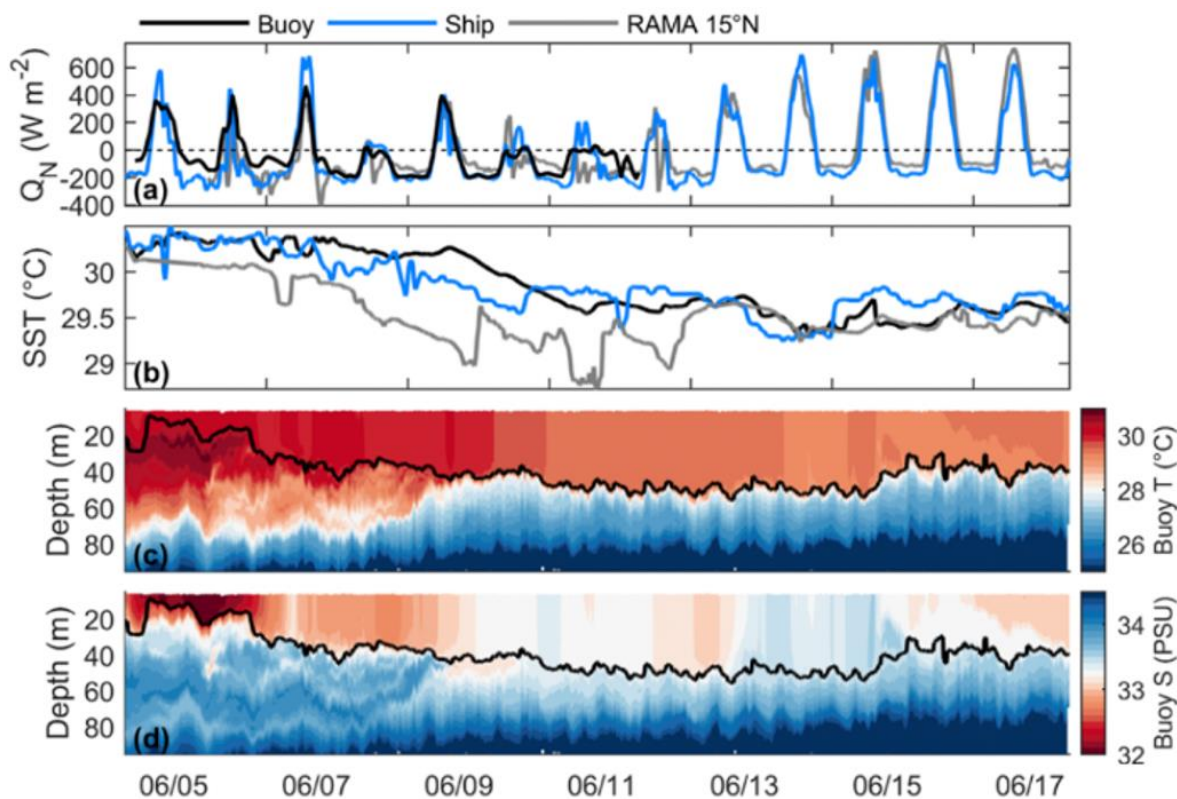


Рис. 15 – (а) тепловий потік Сонячного випромінювання і (б) Температура поверхні океану буй (чорний), корабель (синій) і причал RAMA 15°N (сірий) (с) вертикальний розподіл температури (буй) (д) вертикальний розподіл солоності (буй) [12]

Висновки

Проведене дослідження виявило низку важливих особливостей міжрічної мінливості мусонних депресій над акваторією Бенгальської затоки. Встановлено, що в останні десятиліття XX століття спостерігалася стійка тенденція до зменшення повторюваності МД, незважаючи на зростання температури поверхні океану в регіоні. Цей факт вказує на переважаючий вплив інших чинників, що не сприяють для формування та інтенсифікації МД.

Проаналізовано особливості внутрішньомісячної мінливості МД. Встановлено, що ослаблення ВЗК зазвичай супроводжується зменшенням повторюваності МД над Бенгальською затокою. Отримані результати сприятимуть підвищенню якості прогнозів несприятливих погодних умов на морських шляхах у

Бенгальській затоці Індійського океану, зниженню ризиків для морського транспорту та оптимізації стратегій планування логістики у регіоні.

Вперше звернуто увагу на відмінності в інтенсивності та стійкості мусонної циркуляції у Аравійському морі та Бенгальській затоці. В результаті виконаних досліджень можна сформулювати попередні висновки стосовно того, що аномальна солоність і Аравійському морі через зменшення випаровування з поверхні аравійського моря стримує конвекційні процеси, що підсилює мусонні вітри і зменшує вірогідність утворення МД і їх трансформацію у ТЦ.

Вперше звернуто увагу на те, що збільшення кутової швидкості обертання землі навколо своєї вісі сприятиме стійкості у часі мусонної циркуляції.

Перелік використаних джерел

- [1] Prajeesh A., Ashok K., Rao D. Falling monsoon depression frequency: A Gray-Sikka conditions perspective. *Scientific Reports*. 2013. Vol. 3. Article 2989. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep02989>.
- [2] On The Decreasing Trend of Monsoon Depressions over Bay of Bengal / Vishnu S., Francis P.A., Shenoi S.S.C., Ramakrishna S.S.V.S. *Environmental Research Letters*. 2016. Vol. 11, № 1. Article 014011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/1/014011>.
- [3] Sørland S.L., Sorteberg A. The dynamic and thermodynamic structure of monsoon low-pressure systems during extreme rainfall events. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2015. Vol. 67(1). Article 27039. DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v67.27039>.
- [4] On the Structure and Dynamics of Indian Monsoon Depressions / K.M.R. Hunt et al. *Monthly Weather Review*. 2016. Vol. 144, iss. 9. Pp. 3391-3416. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0138.1>.
- [5] Berry G., Reeder M.J. Objective Identification of the Intertropical Convergence Zone: Climatology and Trends from the ERA-Interim. *Journal of Climate*. 2014. Vol. 27, iss. 5. Pp. 1894-1909. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00339.1>.
- [6] Stratified and Stirred: Monsoon Freshwater in the Bay of Bengal. URL: <https://core.ac.uk/download/222895879.pdf> (дата звернення 16.03.2025).
- [7] Submesoscale-selective compensation of fronts in a salinity-stratified ocean. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1701504> (дата звернення 16.03.2025).
- [8] Thakur et al. Shoreline change assessment of Indus delta using GIS-DSAS and satellite data. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352485522001256> (дата звернення 16.03.2025).
- [9] Sengupta et. al. Warm pool thermodynamics from the Arabian Sea Monsoon Experiment (ARMEX). URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007JC004623> (дата звернення 18.03.2025).
- [10] Thadathil et al. Surface layer temperature inversion in the Bay of Bengal: Main characteristics and related mechanisms. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2016jc011674> (дата звернення 20.03.2025).
- [11] Shroyer et al. Seasonality and Buoyancy Suppression of Turbulence in the Bay of Bengal. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018GL081577> (дата звернення 20.03.2025).
- [12] Bay of Bengal: 2013 Northeast Monsoon Upper-Ocean Circulation. URL: <https://tos.org/oceanography/article/bay-of-bengal-2013-northeast-monsoon-upper-ocean-circulation2013> (дата звернення 20.03.2025).
- [13] IMD's cyclone eAtlas web-portal. URL: <http://www.rmccennaieatlas.tn.nic.in> (дата звернення 21.03.2025).
- [14] Yoon J.-H., Huang W.-R. Indian Monsoon Depression: Climatology and Variability. *Modern Climatology*. 2012. Pp. 45-72. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/37917>.
- [15] Thermal Controls on the Asian Summer Monsoon / G. Wu et al. *Scientific reports*. 2012. Vol. 2. Article 404. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep00404>.
- [16] Shukla J. CISK-Barotropic-Baroclinic Instability and the Growth of Monsoon Depressions. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1978. Vol. 35, iss. 3. Pp. 495-508. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1978\)035<0495:CBBIAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1978)035<0495:CBBIAT>2.0.CO;2).
- [17] Francis P., Gadgil S. Intense rainfall events over the west coast of India. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 2006. Vol. 94. Pp. 27-42.: <https://doi.org/10.1007/s00703-005-0167-2>.
- [18] India Meteorological Department. URL: <https://mausam.imd.gov.in/> (дата звернення 25.03.2025).
- [19] Sikka D.R., Gadgil S. On the Maximum Cloud Zone and the ITCZ over Indian Longitudes during the Southwest Monsoon. *Monthly Weather Review*. 1980. Vol. 108, iss. 11. Pp. 1840-1853. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1840:OTMCZA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1840:OTMCZA>2.0.CO;2).
- [20] Wang C.-C., Magnusdottir G. The ITCZ in the Central and Eastern Pacific on Synoptic Time Scales. *Monthly weather review*. 2006. Vol. 134, iss. 5. Pp. 1405-1421. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR3130.1>.
- [21] Сезон тропічних циклів північної частини Індійського океану 2018 року. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сезон_тропических_циклонов_северной_части_Индийского_океана_2018_года (дата звернення 30.03.2025).
- [22] Нова парадигма акумулятивного рельєфоутворення у мілководних районах океанів та морів: монографія / І.І. Гладких та ін. Одеса: НУ «ОМА», 2021. 199 с.
- [23] Missions of the EOP Product Centre of the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). URL: <https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/> (дата звернення 30.03.2025).
- [24] JAXA Global Rainfall Watch (GSMP). URL: <https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMP/> (дата звернення 30.03.2025).
- [25] Current Marine Data. URL: <http://www.oceanweather.com/data> (дата звернення 02.04.2025).
- [26] Bay of Bengal Intraseasonal Oscillations and the 2018 Monsoon Onset. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/102/10/BAMS-D-20-0113.1.xml> (дата звернення 02.04.2025).

- [27] Deutsche Meteorologische Bibliothek. URL: https://www.dwd.de/DE/Home/home_node.html (дата звернення 02.04.2025).
 [28] Bulletin Aviso. URL: http://bulletin.aviso.oceanobs.com/html/produits/avis_o/welcome_uk.php3 (дата звернення 02.04.2025).

STUDY OF THE VARIABILITY OF THE «MONSOON DEPRESSION» IN THE BAY OF BENGAL

- Tomchakovsky G.** senior lecturer, postgraduate student, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9799-4368>, e-mail: gtomchakovsky@gmail.com;
Kapochkina M. PhD (Engineering), associate professor, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4893-2523>, e-mail: kapochkinamargarita@gmail.com;
Kalinichenko E. PhD (Engineering), associate professor, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-7313>, e-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com

Monsoon depressions (MD), as areas of low pressure that form over the Bay of Bengal, have a significant impact on weather conditions during the summer monsoon. They are characterized by stormy winds, high waves, intense cloudiness and heavy rains, posing a danger to maritime navigation and coastal infrastructure in the region. The temporal variability of MD is characterized by significant changes in a wide range of scales - from interannual to intramonthly. Understanding the reasons that control the variability of the MD regime is necessary to reduce risks and losses in the maritime transport sector, which plays a key role in the world economy. Two types of MDs of the Bay of Biscay, including those with a radius of up to 2 thousand km, were studied. It was shown that both types of MDs, under favorable conditions, are equally transformed into a tropical cyclone. It was determined that the formation of MDs in the Bay of Biscay does not contribute to the sustainable development of the summer monsoon circulation. It was determined that the formation of MDs during the summer monsoon is typical only for the Bay of Biscay. This difference is associated with special conditions in the ocean atmosphere that arise due to convective instability over the sparse ocean zones in river deltas. It was established for the first time that MDs in the Bay of Biscay are formed cyclically, that is, under the influence of certain conditions. The time of MD formation coincides with a temporary decrease in centrifugal force under conditions of a decrease in the angular velocity of the Earth's rotation around its axis. This is confirmed by the fact that the cyclical formation of MD in the Bay of Biscay stops during a local increase in the angular velocity of the Earth's rotation during the summer solstice. The results obtained create a basis for improving the quality of weather forecasts on sea routes in the northern Indian Ocean and optimizing strategies for minimizing weather risks for the maritime industry.

Keywords: monsoon depression, monsoon climate, shipping, intratropical convergence zone, maritime navigation, ocean salinity.

References

- [1] A. Prajeesh, K. Ashok, and D. Rao, "Falling monsoon depression frequency: A Gray-Sikka conditions perspective," *Scientific Reports*, vol. 3, article 2989, 2013. doi: 10.1038/srep02989.
 [2] S. Vishnu, P.A. Francis, S.S.C. Shenoi, and S.S.V.S. Ramakrishna, "On The Decreasing Trend of Monsoon Depressions over Bay of Bengal," *Environmental Research Letters*, vol. 11, № 1, article 014011, 2016. doi: 10.1088/1748-9326/11/1/014011.
 [3] S.L. Sørland, and A. Sorteberg, "The dynamic and thermodynamic structure of monsoon low-pressure systems during extreme rainfall events," *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, vol. 67(1), article 27039, 2015. doi: 10.3402/tellusa.v67.27039.
 [4] K.M.R. Hunt, A.G. Turner, P.M. Inness, D.E. Parker, and R.C. Levine, "On the Structure and Dynamics of Indian Monsoon Depressions," *Monthly Weather Review*, vol. 144, iss. 9, pp. 3391-3416, 2016. doi: 10.1175/MWR-D-15-0138.1.
 [5] G. Berry, and M.J. Reeder, "Objective Identification of the Intertropical Convergence Zone: Climatology and Trends from the ERA-Interim," *Journal of Climate*, vol. 27, iss. 5, pp. 1894-1909, 2014. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00339.1.
 [6] Stratified and Stirred: Monsoon Freshwater in the Bay of Bengal. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/222895879.pdf>. Accessed on: March 16, 2025.
 [7] Submesoscale-selective compensation of fronts in a salinity-stratified ocean. [Online]. Available: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1701504>. Accessed on: March 16, 2025.
 [8] Thakur et al. Shoreline change assessment of Indus delta using GIS-DSAS and satellite data. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352485522001256>. Accessed on: March 16, 2025.
 [9] Sengupta et. al. Warm pool thermodynamics from the Arabian Sea Monsoon Experiment (ARMEX). [Online]. Available:

- <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007JC004623>. Accessed on: March 18, 2025.
- [10] Thadathil et al. Surface layer temperature inversion in the Bay of Bengal: Main characteristics and related mechanisms. [Online]. Available: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2016jc011674>. Accessed on: March 20, 2025.
- [11] Shroyer et al. Seasonality and Buoyancy Suppression of Turbulence in the Bay of Bengal. [Online]. Available: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018GL081577>. Accessed on: March 20, 2025.
- [12] Bay of Bengal: 2013 Northeast Monsoon Upper-Ocean Circulation. [Online]. Available: <https://tos.org/oceanography/article/bay-of-bengal-2013-northeast-monsoon-upper-ocean-circulation2013>. Accessed on: March 20, 2025.
- [13] IMD's cyclone eAtlas web-portal. [Online]. Available: <http://www.rmccchennaieatlas.tn.nic.in>. Accessed on: March 21, 2025.
- [14] J.-H. Yoon, and W.-R. Huang, "Indian Monsoon Depression: Climatology and Variability," *Modern Climatology*, pp. 45-72, 2012. doi: 10.5772/37917.
- [15] G. Wu, Y. Liu, B. He, Q. Bao, A. Duan, and F.-F. Jin, "Thermal Controls on the Asian Summer Monsoon," *Scientific reports*, vol. 2, article 404, 2012. doi: 10.1038/srep00404.
- [16] J. Shukla, "CISK-Barotropic-Baroclinic Instability and the Growth of Monsoon Depressions," *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 35, iss. 3, pp. 495-508, 1978. doi: 10.1175/1520-0469(1978)035<0495:CBBIAT>2.0.CO;2.
- [17] P. Francis, and S. Gadgil, "Intense rainfall events over the west coast of India," *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 94, pp. 27-42, 2006. doi: 10.1007/s00703-005-0167-2.
- [18] India Meteorological Department. [Online]. Available: <https://mausam.imd.gov.in/>. Accessed on: March 25, 2025.
- [19] D.R. Sikka, and S. Gadgil, "On the Maximum Cloud Zone and the ITCZ over Indian Longitudes during the Southwest Monsoon," *Monthly Weather Review*, vol. 108, iss. 11, pp. 1840-1853, 1980. doi: 10.1175/1520-0493(1980)108<1840:OTMCZA>2.0.CO;2.
- [20] C.-C. Wang, and G. Magnusdottir, "The ITCZ in the Central and Eastern Pacific on Synoptic Time Scales," *Monthly weather review*, vol. 134, iss. 5, pp. 1405-1421, 2006. doi: 10.1175/MWR3130.1.
- [21] Sezon tropichnykh tsykliv pivnichnoi chastyny Indii-skoho okeanu 2018 roku (2018 North Indian Ocean Tropical Cyclone Season). [Online]. Available: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сезон_тропических_циклонов_северной_части_Индийского_океана_2018_года. Accessed on: March 30, 2025. (Rus.)
- [22] I.I. Hladkykh, M.B. Kapochkina, N.V. Kucherenko, and B.B. Kapochkin, *Nova paradyhma akumuliatyvnoho reliefoutvorennia u milkovodnykh raionakh okeaniv ta moriv: monohrafiia* [A new paradigm of accumulative relief formation in shallow areas of oceans and seas: monograph]. Odesa, Ukraine: NU «OMA», 2021. (Ukr.)
- [23] Missions of the EOP Product Centre of the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). [Online]. Available: <https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>. Accessed on: March 30, 2025.
- [24] JAXA Global Rainfall Watch (GSMaP). [Online]. Available: <https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/>. Accessed on: March 30, 2025.
- [25] Current Marine Data. [Online]. Available: <http://www.oceanweather.com/data>. Accessed on: April 02, 2025.
- [26] Bay of Bengal Intraseasonal Oscillations and the 2018 Monsoon Onset. [Online]. Available: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/102/10/BAMS-D-20-0113.1.xml>. Accessed on: April 02, 2025.
- [27] Deutsche Meteorologische Bibliothek. [Online]. Available: https://www.dwd.de/DE/Home/home_node.html. Accessed on: April 02, 2025.
- [28] Bulletin Aviso. [Online]. Available: http://bulletin.aviso.oceanobs.com/html/produits/avis_o/welcome_uk.php3. Accessed on: April 02, 2025.

Стаття надійшла 25.04.2025

Стаття прийнята 14.05.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: 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: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344961>.