

Г. Г. Томчаковський

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧИННИКІВ МІЖРІЧНОЇ ТА ВНУТРІШНЬОСЕЗОННОЇ МІНЛИВОСТІ МУСОННОЇ ДЕПРЕСІЇ В ІНДІЙСЬКОМУ ОКЕАНІ

Анотація. Мусонні депресії (МД) – області зниженого тиску з циклонічною циркуляцією, що формуються над акваторією Бенгальської затоки – мають значний вплив на погодні умови в північній частині Індійського океану в період літнього мусону. Вони характеризуються штормовим вітром, високими хвилями, інтенсивною хмарністю і сильними дощами, становлячи серйозну загрозу для морського судноплавства і берегової інфраструктури в регіоні. Повторюваність та інтенсивність МД схильні до істотних коливань у часі в широкому діапазоні масштабів - від внутрішньосезонного до міждекадного. Розуміння чинників, що контролюють мінливість режиму МД, необхідне для зниження ризиків і втрат у секторі морського транспорту, що відіграє ключову роль в світовій економіці. У цій роботі на основі комплексного аналізу даних реаналізу, спостережень і чисельних експериментів досліджуються великомасштабні динамічні та термодинамічні чинники, що визначають режим МД на міжрічному і внутрішньосезонному часових масштабах. Показано, що зміни циркуляції атмосфери і температури поверхні океану в останні десятиліття сприяли зменшенню кількості МД над Бенгальською затокою. Водночас результати регіональних модельних експериментів свідчать про можливе зростання повторюваності МД в умовах триваючого потепління Світового океану. Аналіз внутрішньосезонних варіацій виявив статистично значущі зв'язки активності МД із коливаннями інтенсивності та положення внутрішньотропічної зони конвергенції (ВЗК). Кількісні оцінки, отримані в роботі, 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, мусонна циркуляція, циклогенез, міжрічна мінливість, внутрішньосезонні варіації, погодні ризики, внутрішньотропічна зона конвергенції, дистанційне зондування.

Вступ

Постановка проблеми. Мусонні депресії (МД) – характерний елемент літньої циркуляції атмосфери над північною частиною Індійського океану. Вони являють собою великі області зниженого тиску з циклонічною циркуляцією в нижній тропосфері, що формуються над акваторією Бенгальської затоки. 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 в Бенгальській затоці, тому інформація про їхнє переміщення та інтенсивність критично важлива для планування маршрутів і термінів морських перевезень. Повторюваність МД схильна до значних міжрічних коливань. В окремі роки над Бенгальською затокою може формуватися до 10 – 12 таких систем за сезон, тоді як в інші роки їхня кількість скорочується до 1 – 2. Крім цього, частота МД зазнає помітних змін у масштабі кількох десятиліть. Так, в останній чверті XX століття відзначалася тенденція до зменшення кількості МД, особливо глибоких, що формуються над Бенгальською затокою [1]. Водночас статистика останніх років вказує на значну активізацію циклогенезу над акваторією затоки на початку XXI століття. В окремі роки тут відзначалося до 7-8 мусонних депресій за сезон [2].

Настільки значна мінливість повторюваності МД на різних часових масштабах порушує питання про фактори, що її визначають. У проаналізованих дослідженнях за даною проблемою зазначалося, що до числа основних предикторів циклогенезу над Бенгальською затокою відносяться температура поверхні океану, відносна завихреність і збіжність

потоків у нижній тропосфері, величина вертикального зсуву вітру і запаси прихованого тепла в атмосфері [3]. Аномалії цих параметрів в останні десятиліття могли сприяти зміні режиму циклогенезу над акваторією затоки. Зокрема, на тлі триваючого зростання температури поверхні океану відзначалися тенденції до зменшення вологовмісту в середній тропосфері та посилення вертикального зсуву вітру [4]. Однак кількісні оцінки відносної ролі цих факторів у спостережуваних міждекадних коливаннях МД залишаються предметом дискусій.

Інший важливий аспект проблеми полягає в можливому впливі на циклогенез над Бенгальською затокою інтенсивних внутрішньосезонних варіацій літнього мусону, відомих як активні та переривчасті фази. 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 вітро-хвильової активності над акваторією затоки. І навпаки, ослаблення ВЗК призводить до зменшення повторюваності МД і поліпшення погодних умов для судноплавства. Однак систематичний аналіз статистичних зв'язків між характеристиками ВЗК і режимом МД у літературі відсутній.

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 вітро-хвильової 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 планування морських операцій у регіоні. Це, своєю чергою, дасть змогу зменшити економічні втрати та ризики для морського транспорту, пов'язані з впливом небезпечних погодних явищ.

Метою даної роботи є кількісна оцінка чинників, що визначають мінливість мусонних депресій на міжрічному і внутрішньосезонному часових масштабах. Дослідження, на основі комплексного аналізу даних реаналізу, спостережень і чисельного моделювання, великомасштабних динамічних та термодинамічних чинників, що визначають мінливість циклогенезу над акваторією Бенгальської затоки в широкому діапазоні часових масштабів – від внутрішньосезонного до міждекадного.

Виявлення аномалії циркуляції атмосфери і температури поверхні океану, що впливають на повторюваність та інтенсивність мусонних депресій.

Автор вважає, що реалізація цих завдань дасть змогу визначити предиктори циклогенезу над Бенгальською затокою, важливі для прогнозу погодних умов на морських шляхах в Індійському океані та прилеглих районах у періоди літнього мусону. А це, в свою чергу, сприятиме зниженню ризиків і втрат у секторі морських перевезень, який робить значний внесок в економіку регіону.

Основна частина

Мусонна депресія – один із ключових елементів літньої мусонної циркуляції над Індійським океаном і прилеглими районами Південної Азії (рис. 1).

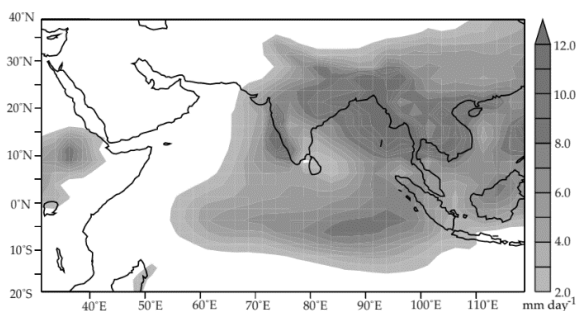


Рис. 1. Середня кількість опадів (мм/день) у період літнього мусону (червень-вересень) [13]

Це синоптичний вихор із замкнутою циклонічною циркуляцією в нижній тропосфері та характерними горизонтальними розмірами 1000 – 2000 км. Формування МД відбувається головним чином над акваторією північної частини Бенгальської затоки.

Виникнувши над теплими водами затоки, МД поступово зміщуються на північний захід і в кінцевому підсумку заповнюються над Індійським субконтинентом. Тривалість життєвого циклу типової МД становить від 3 до 6 діб [6].

Зародження МД над водами Бенгальської затоки відбувається за поєднання низки сприятливих великомасштабних чинників. До них належать високі значення температури поверхні океану, циклонічна завихреність у нижній тропосфері (на рівні 850 гПа), підвищений вологовміст повітря в середній тропосфері, а також порівняно слабе вертикальне зрушення вітру. Цікаво, що це той самий набір необхідних умов, який сприяє генезису тропічних циклонів над іншими акваторіями Світового океану. Однак у період літнього мусону над Аравійським морем і Бенгальською затокою спостерігається дуже сильний вертикальний зсув вітру між нижньою і верхньою тропосферою. Цей фактор перешкоджає подальшій інтенсифікації мусонних депресій до стадії тропічних циклонів – на відміну від того, що має місце в інших океанічних басейнах Північної півкулі, де пік активності тропічних циклонів якраз припадає на літні місяці [7]. Розвиток і підтримання МД протягом кількох днів над водами Бенгальської затоки та прилеглою територією суші пов'язують зі спільним проявом кількох типів гідродинамічної нестійкості мусонної течії. Ключову роль тут відіграють бароклінно-баротропна нестійкість і умовна нестійкість 2-го роду (CISK) [8]. Згідно з сучасними уявленнями, на початковій стадії життєвого циклу МД основне значення має баротропна нестійкість зональних вітрів у нижній тропосфері над океаном. Надалі домінуючу роль у підтримці циркуляції МД протягом декількох діб відіграють процеси бароклінно-нестійкості та CISK [3].

Вертикальна структура МД характеризується наявністю холодного ядра на нижніх рівнях тропосфери і теплого ядра на верхніх рівнях (500 – 300 гПа). Висхідні рухи в циркуляції МД зазвичай простежуються до рівня 300 гПа. Максимум циклонічної завихреності розташований у середній тропосфері близько 800 гПа. Як показав комплексний аналіз на основі даних реаналізу ERA-Interim, зона максимальних опадів розташовується в південно-західному секторі МД щодо центру циркуляції [9 – 10]. Характерне значення добових опадів, пов'язаних із проходженням МД, становить 30 – 50 см води на площі радіусом 200 – 300 км. В окремих випадках добові суми опадів можуть перевищувати 60 см. Просторовий розподіл опадів, пов'язаних з МД, дуже неоднорідний і визначається орографією Індійського субконтиненту. Основна зона інтенсивних опадів захоплює Бенгальську затоку, Бангладеш і північний схід Індії. У періоди активної конвекції над Бенгальською затокою і проходження МД підвищена кількість опадів спостерігається також на навітряних схилах Західних Гат в Індії. Тут визначальну роль відіграє вимушений підйом мусонного потоку під час обтікання гірського бар'єру, що сприяє інтенсифікації облогових орографічних опадів [11, 12]. У середньому за сезон над акваторією північної частини Бенгальської затоки формується близько 6 мусонних депресій (рис. 2).

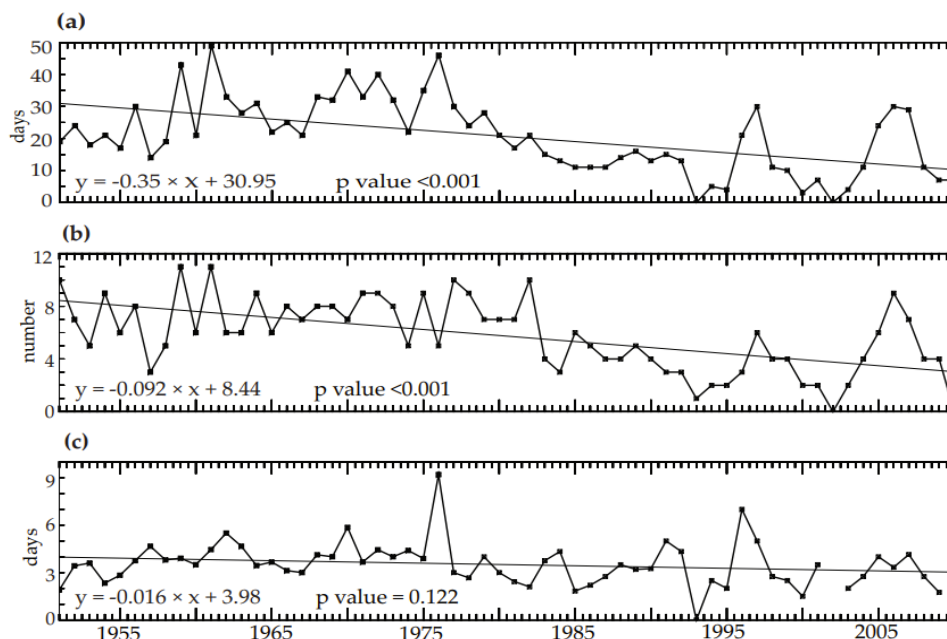


Рис. 2. Статистичні дані кількості мусонних депресій за сезон: а – кількості днів МД, б – кількості МД, с – середньої тривалості життя (уднях) МД під час літнього мусонного сезону [13]

Однак від року до року це число схильне до дуже великих коливань. У деяких літніх сезонах тут відзначається до 10 – 12 МД, тоді як в інші роки їхня кількість може скорочуватися до 1 – 2. Загальний внесок МД у сумарну кількість опадів за літній мусон також варіюється в широкому діапазоні – від 35 до 55 % за даними різних досліджень [14]. Оцінка цього внеску для центральних районів Індії за даними IMD [India Meteorological Department] за період 1901 – 2010 рр. наведена на рис. 3.

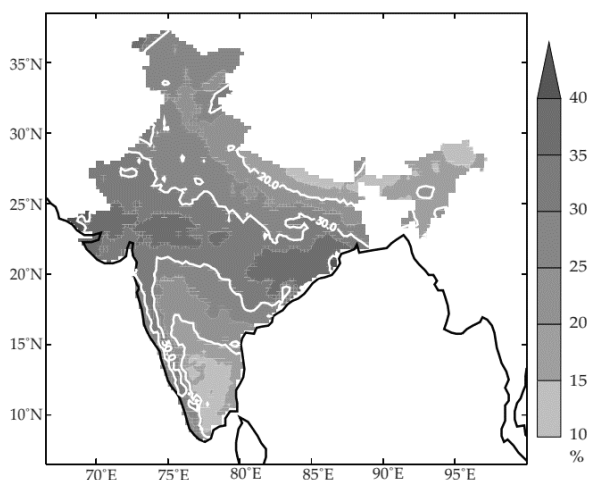


Рис. 3. Відношення (у %) суми опадів, пов'язаних із мусонними депресіями, до загальної кількості опадів за сезон [13]

Крім дуже великої міжрічної мінливості, частота формування МД схильна також до помітних міждекадних коливань. Аналіз тривалих рядів даних про повторюваність МД свідчить про тенденцію до зменшення їхньої кількості протягом останніх десятиліть ХХ століття. Ця тенденція супроводжувалася зустрічним збільшенням повторюваності слабших циклонічних збурень із замкнутою циркуляцією, але

меншими баричними градієнтами в центрі [15]. Очевидно, в останні десятиліття інтенсифікація систем зниженого тиску до стадії МД почала відбуватися рідше – це пов'язано зі зміною деяких фонових параметрів стану атмосфери й океану над акваторією Бенгальської затоки.

Як показують наукові дослідження у періоди зменшення кількості МД після 1980 року спостерігалися несприятливі для їх генезису та інтенсифікації аномалії циркуляції нижньої тропосфери. Зокрема, відзначалося ослаблення циклонічної завихреності на рівні 850 гПа в північній частині Бенгальської затоки. При цьому мало місце посилення вертикального і горизонтального зсуву зонального вітру між екваторіальною зоною і областю літнього мусону.

Ще одне можливе пояснення зменшення кількості МД в останні десятиліття пов'язане зі змінами температурного режиму поверхні Бенгальської затоки. Хоча, здавалося б, підвищення температури поверхні океану має сприяти почастищенню випадків формування МД. До початку 1980-х років міждекадні варіації температури води в Бенгальській затоці та повторюваності МД демонстрували подібний характер [16]. Однак згодом даний зв'язок порушився. Виходячи з цього, дія інших чинників, несприятливих для циклогенезу, виявилася істотною. Зокрема, автори одного з досліджень за наявною проблемою пов'язали зменшення повторюваності МД із посиленням вітру у верхній тропосфері над Бенгальською затокою (на рівні 100 гПа) [17]. Проте, з іншого боку, тенденція до скорочення числа МД пояснюється прогресуючим зменшенням вологовмісту повітря в середній тропосфері над акваторією затоки.

Таким чином, зміни великомасштабних динамічних і термодинамічних параметрів атмосфери відповідальні за спостережуване в останні десятиліття зменшення повторюваності мусонних депресій над Бенгальською затокою. Дискусійним залиша-

ється питання про кількісний внесок окремих чинників (завихреність, зсуви вітру, вологість повітря та ін.) у цю міждекадну мінливість.

Не враховуючи довгоперіодні варіації, частота формування та інтенсифікації МД схильна до значних внутрішньосезонних коливань, пов'язаних зі зміною активних і перервних фаз літнього мусону над Індією. Автор акцентує увагу на тісному зв'язку циклогенезу над Бенгальською затокою з переміщеннями ВЗК. Активна фаза континентальної ВЗК, зміщеної на північ від свого середнього літнього положення, підтримується за рахунок серії рухомих циклонічних збурень. Вони послідовно формуються на східній периферії мусонної улоговини над Бенгальською затокою і потім зміщуються вздовж осі улоговини на північний захід, у бік Пакистану. Цей ланцюжок хвильових збурень, що нерідко досягають стадії МД, може існувати до двох тижнів, викликаючи тривалий період інтенсивних мусонних опадів над Індією. Подібний висновок отримано в [18]. Було встановлено, що регенерація ВЗК в активну фазу мусону після періоду її ослаблення або тимчасового зникнення пов'язана з повторним формуванням синоптичних збурень над районами генезису МД. На основі супутникових даних і результатів реаналізу можна сказати, що характеристики ВЗК над Індійським океаном схильні до значної синоптичної мінливості, зумовленої взаємодією зони конвекції з рухомими циклонічними вихорами [19]. Особливо чітко ця взаємодія проявляється під час посилення меридіональної складової вітру в нижній тропосфері та активізації ВЗК.

Проведене дослідження вказує на важливу роль внутрішньотропічної зони конвергенції як фактора, що модулює частоту й інтенсивність МД над акваторією Бенгальської затоки. Водночас кількісний аналіз цього взаємозв'язку в масштабі окремих внутрішньосезонних варіацій мусонної циркуляції до теперішнього часу не проводився. Заповнення цієї прогалини на основі сучасних масивів даних спостережень і глобальних моделей видається важливим завданням подальших досліджень мінливості МД.

Висновки

Проведене дослідження виявило низку важливих особливостей міждекадної та внутрішньосезонної мінливості мусонних депресій над акваторією Бенгальської затоки. Встановлено, що в останні десятиліття ХХ століття спостерігалася стійка тенденція до зменшення повторюваності МД, незважаючи на триваюче зростання температури поверхні океану в регіоні. Цей факт вказує на переважаючий

вплив інших чинників, несприятливих для формування та інтенсифікації МД. До їх числа відносяться ослаблення циклонічної завихреності в нижній тропосфері, посилення вертикального зсуву вітру та зменшення вологовмісту повітря в середній тропосфері над Бенгальською затокою. Водночас кількісна оцінка відносного внеску кожного з цих факторів у спостережувану міждекадну мінливість режиму МД потребує подальших досліджень із залученням розширеного масиву даних та вдосконалених методів діагностики.

Поряд із довгоперіодними коливаннями, в роботі також проаналізовано особливості внутрішньосезонної мінливості МД та її зв'язок з крупномасштабними модами атмосферної циркуляції. Показано, що частота й інтенсивність МД схильні до значних варіацій у масштабі окремих місяців всередині літнього сезону, які тісно пов'язані з чергуванням активних і перервних фаз мусону над Індією. Встановлено, що одним із ключових чинників, які модулюють інтенсивність циклогенезу над Бенгальською затокою, є внутрішньотропічна зона конвергенції. Активізація ВЗК та її зміщення на північ від середнього літнього положення сприяють почастищенню випадків формування МД та посиленню пов'язаної з ними штормової активності. І навпаки, ослаблення ВЗК зазвичай супроводжується зменшенням повторюваності циклонічних збурень над акваторією затоки. Розвиток уявлень про характер та фізичні механізми цих взаємозв'язків становить перспективний напрямок подальших досліджень, важливий з точки зору вдосконалення схем прогнозу погодних умов над північною частиною Індійського океану.

Результати, отримані в роботі, вказують на необхідність комплексного підходу до вивчення просторово-часової мінливості МД, який би поєднував поглиблений аналіз даних спостережень, реаналізу та чисельного моделювання. Особливу увагу при цьому слід приділити модельним експериментам із систематичним варіюванням параметрів підстильної поверхні та характеристик великомасштабного поля вітру в атмосфері. Це дозволить точніше діагностувати фізичні фактори, що визначають особливості циклогенезу над Бенгальською затокою на різних часових масштабах – від внутрішньосезонного до міждекадного. Отримані результати матимуть важливе практичне значення. Вони сприятимуть підвищенню якості прогнозів погодних умов на морських шляхах у північній частині Індійського океану, зниженню ризиків для морського транспорту та оптимізації стратегій планування морських операцій у регіоні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Prajeesh, A., Ashok, K. & Rao, D. Falling monsoon depression frequency: A Gray-Sikka conditions perspective. *Sci Rep* 3, 2989 (2013). DOI: <https://doi.org/10.1038/srep02989>.
2. Vishnu, S., Francis, P. A., Shenoi, S. S. C., Ramakrishna, S. S. V. S. (2015). On The Decreasing Trend of Monsoon Depressions over Bay of Bengal. Annual Monsoon Workshop National Symposium on Understanding and Forecasting the Monsoon Extremes, Indian Meteorological Society, Pune Chapter, India. DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/1/014011>.
3. Sørland, S. L., & Sorteberg, A. (2015). The dynamic and thermodynamic structure of monsoon low-pressure systems during extreme rainfall events. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 67(1). DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v67.27039>.
4. Kieran M. R. Hunt, Andrew G. Turner, Peter M. Inness, David E. Parker, Richard C. Levine. (2016) On the Structure and Dynamics of Indian Monsoon Depressions. *Monthly Weather Review*, Volume 144: Issue 9, Page(s): 3391–3416. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0138.1>.

5. Gareth Berry, Michael J. Reeder. (2014) Objective Identification of the Intertropical Convergence Zone: Climatology and Trends from the ERA-Interim. *Journal of Climate*, Volume 27: Issue 5. Page(s): 1894–1909. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00339.1>.
6. Jin-Ho Yoon and Wan-Ru (Judy) Huang. (2012) Indian Monsoon Depression: Climatology and Variability. *Modern Climatology*. InTech. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/37917>.
7. Wu, G., Y. Liu, B. He, Q. Bao, A. Duan, and F. F. Jin. (2012) Thermal Controls on the Asian Summer Monsoon. *Scientific reports* 2, 404. URL: <https://doi.org/10.1038/srep00404>.
8. J. Shukla. CISK-Barotropic-Baroclinic Instability and the Growth of Monsoon Depressions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Volume 35: Issue 3, Page(s): 495–508. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1978\)035<0495:CBBIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1978)035<0495:CBBIA>2.0.CO;2).
9. Kieran M. R. Hunt, Andrew G. Turner, Peter M. Inness, David E. Parker, Richard C. Levine. (2016) On the Structure and Dynamics of Indian Monsoon Depressions. *Monthly Weather Review*, Volume 144: Issue 9, Page(s): 3391–3416. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0138.1>.
10. Доля В.Д. Мусони, як частина глобальної циркуляції атмосфери Землі, геофізична природа явища. зб. наук. праць XII Міжнародної наукової міждисциплінарної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Шевченківська весна – 2014, Частина 3: географія”: тези доповіді. Випуск XII. Київ, 18-22 бер. 2014. С.93. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.4605.7447>.
11. Francis, P., Gadgil, S. (2006) Intense rainfall events over the west coast of India. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 94, 27–42. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00703-005-0167-2>.
12. Колесник А. В., Доля В. Д., Кучеренко Н. В. Использование ГИС для изучения причин формирования муссонов Индийского океана. *Часопис картографії*. 2015. Вип. 12. С. 82–89. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh_2015_12_11.
13. India Meteorological Department [Електронний ресурс]. Режим доступу: dg.imd@imd.gov.in
14. Jin-Ho Yoon, Tsing-Chang Chen. (2005) Water vapor budget of the Indian monsoon depression. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, Volume: 57 Issue: 5, Page(s): 770–782. DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v57i5.14737>.
15. Капочкін Б. Б., Кучеренко Н.В., Лісоводський В. В., Конкін В. В. Фізичні механізми вирівнювання баричних градієнтів в атмосфері. К., 2003. 12 с. Деп. в ГНТБ України 04.08.03, № 105.
16. Rajeevan, M., U. S. De, and R. K. Prasad, 2000: Decadal variation of sea surface temperatures, cloudiness and monsoon depressions in the north Indian ocean. *Current Science*, Volume: 79, Page(s): 283–285. URL: <https://repository.ias.ac.in/94366/1/decadal.pdf>.
17. Rao, B., D. Rao, and V. B. Rao. (2004) Decreasing trend in the strength of tropical easterly jet during the Asian summer monsoon season and the number of tropical cyclonic systems over bay of Bengal. *Geophysical Research Letters*, Volume: 31. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2004GL019817>.
18. D. R. Sikka and Sulochana Gadgil. On the Maximum Cloud Zone and the ITCZ over Indian Longitudes during the Southwest Monsoon. *Monthly Weather Review*, Volume 108: Issue 11, Page(s): 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).
19. Chia-chi Wang and Gudrun Magnusdottir. (2006) The ITCZ in the Central and Eastern Pacific on Synoptic Time Scales. *Monthly weather review*, Volume 134: Issue 5, Page(s): 1405–1421. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR3130.1>.

Received (Надійшла) 21.08.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.10.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Томчаковський Георгій Георгійович – старший викладач кафедри навігації та управління судном., Одеський національний морський університет, Одеса, Україна;

Georgiy Tomchakovsky – Senior Lecturer, Department of Navigation and Control of the Ship, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine;

e-mail: gtomchakovsky@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-9799-4368>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59557477500>.

Research of factors of interannual and intra-seasonal variability of the monsoon depression in the Indian Ocean

Georgiy Tomchakovsky

Abstract. Monsoon depressions (MDs) – areas of low pressure with cyclonic circulation that form over the Bay of Bengal - have a significant impact on weather conditions in the northern Indian Ocean during the summer monsoon. They are characterised by gale-force winds, high waves, intense cloud cover and heavy rainfall, posing a serious threat to maritime navigation and coastal infrastructure in the region. The recurrence and intensity of MDs are subject to significant fluctuations in time over a wide range of scales, from intra-seasonal to inter-decadal. Understanding the factors that control the variability of the MD regime is essential to reduce risks and losses in the maritime transport sector, which plays a key role in the global economy. In this paper, based on a comprehensive analysis of reanalysis data, observations, and numerical experiments, we investigate the large-scale dynamic and thermodynamic factors that determine the MD regime on interannual and intra-seasonal time scales. It is shown that changes in atmospheric circulation and ocean surface temperature in recent decades have contributed to a decrease in the number of MDs over the Bay of Bengal. At the same time, the results of regional model experiments indicate a possible increase in the frequency of the MDs in the context of the ongoing warming of the World Ocean. The analysis of intra-seasonal variations revealed statistically significant links between the MD activity and fluctuations in the intensity and position of the Intratropical Convergence Zone (ICZ). The quantitative estimates obtained in this work provide a basis for improving the quality of weather forecasts on sea lanes in the northern Indian Ocean and optimising strategies to minimise weather risks for the maritime industry.

Keywords: monsoon depression, monsoon circulation, cyclogenesis, interannual variability, intra-seasonal variations, weather risks, intratropical convergence zone, remote sensing.