

*Кучеренко Н.В., Томчаковський Г. Г., Капочкіна М.Б., Калініченко Є.В.*

## УМОВИ ФОРМУВАННЯ МУСОННОГО ВІТРУ НАД ІНДООКЕАНСЬКОЮ АНОМАЛІЄЮ СИЛИ ТЯЖІННЯ

*Тропічна зона Світового океану характеризується практичною відсутністю просторово часових змін інсоляції, відсутністю баричних градієнтів і, як результат, наявністю лише “пасатів” (зсув шару атмосферного повітря зі сходу на захід зі швидкістю 6 м/с). Така ситуація сприяє безпечному судноплавству. Виключенням є акваторія північної частини Індійського океану, де з червня по серпень генеруються потужні вітри південно-західного напрямку, які формують вітрові хвилі висотою до 7 м. Для забезпечення безпеки мореплавства потрібні методики прогнозування початку та закінчення “сезону” несприятливих погодних умов у зазначеному регіоні. Це потребує створення теорії мусонних вітрів та чисельних розрахунків просторово-часової мінливості літнього мусону. У роботі проаналізовано існуючі гіпотези причин порушення пасатної циркуляції у Індоокеанському регіоні, отримані чисельні оцінки впливу на рухомі оболонки Землі, на прикладі рідкої оболонки, просторово-часових змін прискорення вільного падіння ( $\Delta g$ ).*

**Ключові слова:** безпека судноплавства, мусонний вітер, супутникова альтиметрія, супутникова гравіметрія, фізико-статистичне моделювання, навігаційна гідрометеорологія.

**Вступ.** Тропічна зона океану характеризується практичною відсутністю просторово- часових змін інсоляції, відсутністю баричних градієнтів і, як результат, наявністю “пасатів” (зсуву шару атмосферного повітря зі сходу на захід зі швидкістю до 6 м/с). Така ситуація сприяє безпечному судноплавству, але у серпні – жовтні (північна півкуля) виникає ризик опинитись у зоні дії тропічного циклону. Виключенням є акваторія північної частини Індійського океану, де з червня по серпень генеруються вітри південно-західного напрямку зі швидкістю 12-14 м/с, які формують вітрові хвилі висотою до 7 м. З одного боку - це небезпечно для судноплавства, але з іншого боку, у цей період немає ризиків від тропічних циклонів.

Для забезпечення безпеки мореплавства потрібні методики прогнозування, на першому етапі, початку та закінчення “сезону” несприятливих погодних умов. Це потребує створення теорії мусонних вітрів та чисельних розрахунків просторово-часової мінливості літнього мусону. У роботі проаналізовано існуючі гіпотези причин порушення пасатної циркуляції у Індоокеанському регіоні. Отримані чисельні оцінки впливу на рухомі оболонки Землі, на прикладі рідкої оболонки, часових змін прискорення вільного падіння ( $\Delta g$ ).

Вже досить давно (декілька сторіч) причиною мусонів вважають нерівномірне протягом року нагрівання суші та океану. Декларуються й інші гіпотези формування мусонної циркуляції. Проте жодна з них, як і перша, не пояснює причин щорічного повторення та сталого характеру мусонних вітрів.

Важливо також констатувати, що у Індійському океані зимовий північно-східний мусон в Аравійському морі співпадає з пасатами і повинен посилювати їх, а літній південно-західний мусон - протидіє пасатам і повинен мати меншу потужність у порівнянні з зимовим. Фактично ж, все навпаки.

В Аравійському морі в період літнього мусону біля берегів Сомалі формуються згонні течії, коли температура поверхні океану може знижуватися на 10°C. Внаслідок градієнтів температури, які формуються над морською поверхнею, формуються пд.-зх. вітри, що додатково підсилює літній мусон. Незважаючи на те, що цей процес відноситься до процесів з позитивним зворотним зв'язком, літній мусон раптово переривається наприкінці серпня – вересні.

Вважається, що особливо потужна і стійка мусонна циркуляція виникає там, де проявлені горизонтальні градієнти атмосферного тиску. Фактично ж у тропічній зоні північного сектору

Індійського океану, де мусонний вітер найпотужніший, баричні градієнти не проявлені а ті, що фіксуються, не спроможні генерувати стійкий у часі вітер зі швидкістю до 14 м/с та хвилі висотою до 7 метрів.

Слід також констатувати, що у тропічній зоні умови геострофічності не повинні виконуватися, але стійкий у часі мусонний вітер дме вздовж ізобар, незважаючи на те, що у тропіках дивергентна та конвергентна складові на порядок більші, ніж в помірних широтах.

**Стан вивченості проблеми формування мусонних вітрів.** Донедавна вважалося загальноновизнаним, що термічні умови є основною причиною утворення мусонів і найважливішою характеристикою, що визначає фазу мусону (зимовий або літній) є інсоляція. В роботі [1] наведено огляд інформації про причини виникнення мусонної циркуляції. Проведено критичний аналіз цього огляду. Першу спробу пояснити природу мусонів було зроблено Галлеєм в 1686 р. Його міркування стали основою, так званої, термічної гіпотези розвитку мусонної циркуляції. Подальший розвиток цієї гіпотези отримано в роботі [2], а також в роботах [3,4]. Перелічені автори розглядають мусонну циркуляцію у синоптико-кліматичному аспекті проблеми.

Інша гіпотеза природи мусонної циркуляції – динамічна. Піонерські роботи Шулейкіна В.В. а також його школи [5], розглядали мусони як теплову машину, що працює між нагрівачем і холодильником, які сезонно змінюються місцями залежно від термічних властивостей поверхонь, що підстиляють (суша і океан). Розвинута динамічна гіпотеза в роботах таких авторів, як Лінейкін П.С., Гандіна Л.С., Хромова С.П., Дмитрієва А.А. Важливо зауважити, що ні термічна, ні динамічна гіпотези самостійно неспроможні вичерпно пояснити природу мусонної циркуляції.

Більш пізні уявлення про мусонну циркуляцію та її характерні особливості представлені в роботах [6-8]. В роботі [6] особлива увага приділялася ролі орографічних та трансекваторіальних ефектів у формуванні літнього мусону.

В монографії [8] узагальнено сучасні уявлення про тропічний мусон Індійського регіону. Розвинуто це направлення в роботі [1], де звертається увага на те, що тепловий баланс системи атмосфера – підстиляюча поверхня в акваторії Аравійського моря, різко змінює знак з позитивного на негативний перед настанням літньої фази мусонної циркуляції, а міжрічна мінливість теплового балансу багато в чому впливає на інтенсивність літнього мусону. Автором публікації також відзначено різке збільшення вмісту вологи атмосфери над Аравійським морем перед настанням літнього мусону.

Окремо розвивається нова гіпотеза формування мусонів. В основі цієї гіпотези - вплив просторово-часової мінливості гравітаційного поля Землі на динаміку атмосфери. Розвиток цього наукового спрямування до 1990-х років гальмувало обмеження доступу до даних вимірювань гравітаційного поля Землі у зв'язку з розгортанням міжконтинентальних ракетних програм.

Стартовим науковим дослідженням у цьому напрямі слід вважати публікацію [9], в якій вперше теоретично обґрунтовано можливість формування вертикальних рухів повітря в атмосфері під впливом зміни  $\Delta g$ . Назва публікації “О реакции атмосферы на локальные изменения плотности мантии Земли” повною мірою збігається із темою нашого дослідження. Цитована публікація [9] підвела необхідний науковий фундамент під відкриття раніше невідомого природного явища (Відкриття у СРСР диплом № 273), одним із авторів якого було визнано Бороздича Є.В., який опублікував роботу під назвою “Воздействие короткоживущих подкорковых локальных возмущений на лито-, гидро-и атмосферу” [10]. Як розвиток цього наукового напрямку нами було написано монографію [11] (ухвалена Бороздичем Є. В., особисто). Далі були опубліковані результати наукових досліджень про вплив варіацій гравітаційного поля Землі на атмосферні процеси [12-19]. У цьому науковому напрямі було розроблено та запатентовано технічні рішення, одне з яких [20]. В роботі [21] досліджено глобальну мусонну циркуляцію і заявлено, що мусонні процеси формуються загальнопланетарними процесами:

- зміна тенденції мусонних процесів відбувається синхронно в Американському, Африканському та Азіатському регіонах. В кінці січня, першій половині лютого максимальний розвиток мусонних процесів в південній півкулі і початок їх ослаблення; остання декада липня,

початок серпня – максимальний розвиток мусонних процесів в північній півкулі і початок їх ослаблення;

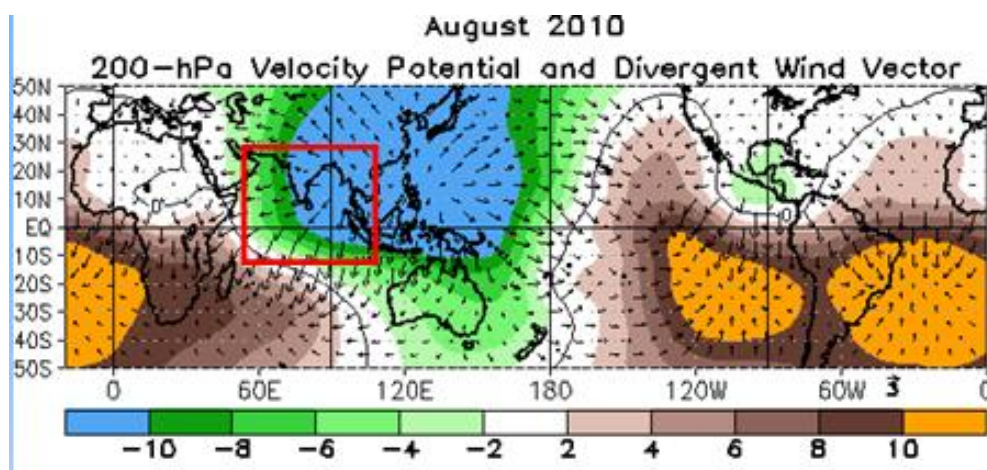
- зміни в тенденції мусонних процесів не співпадають з річним притоком сонячної енергії та його розподілом на Земні кулі.

Доведено, що Північна півкуля в лютому витримує стискання, а Південна півкуля – розтягується [22]. В серпні Північна півкуля витримує розтягування, а Південна півкуля - стискання. Річна мода деформацій в лютому-березні формує ефект опускання поверхні геоїда на 3 мм в районі Північного полюсу, а екваторіальне зміщення на північ вимірюється 1,5 мм, що відповідає обміну мас між півкулями  $1 \pm 0,2 \cdot 10^{16}$  кг та спричиняє додаткову деформацію Землі. Зміна розподілу мас між півкулями спричиняє зміну гравітаційного потенціалу між ними, а це в свою чергу має призводити до зміни розподілу рухомих оболонок Землі.

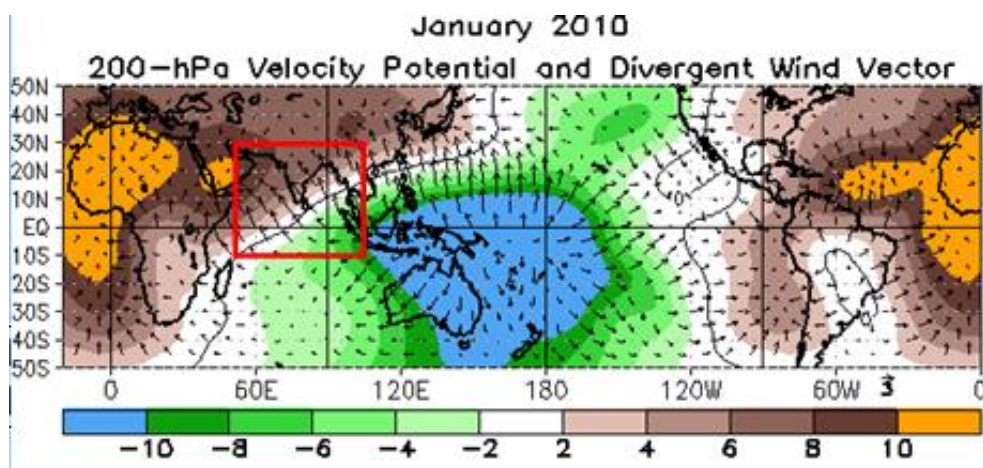
На нашу думку, виявлена у 2001 році “Нова глобальна річна мода геодеформацій” може бути віднесена до класу, так званих, “поплашкових” рухів нашої планети відносно площини екліптики. Важливо пам’ятати про піврічну циклічність кутової швидкості обертання Землі, яка впливає на  $\Delta g$ , з позитивними екстремумами під час літнього (червень-вересень) і зимового (січень-березень) мусону.

Безпосередньо впливу гравітаційного чинника формування мусонних вітрів присвячені публікації [23-25]. В публікації [25] нами вперше розглянуто екстремальну негативну аномалію форми геоїду Індійського океану, як одну з причин формування мусонного типу атмосферної циркуляції у Індокоеанському регіоні. В роботах [11,24,25] виконано узагальнення результатів досліджень багатьох авторів про вплив змін гравітаційного поля у просторі та часі на атмосферну циркуляцію.

В Індійському океані екстремуми  $\Delta g$  спостерігаються навесні та восени. За максимуму  $\Delta g$  вага маси повітря найбільша, а за умов зменшення  $\Delta g$  - вага маси повітря та приземний атмосферний тиск починають зменшуватися. В результаті змін, що відбуваються в полі атмосферного тиску, починається його вирівнювання шляхом “розповзання” максимуму атмосферного тиску. Слід зазначити, що на відміну від звичайного вітру, причиною якого є баричний градієнт, у цій ситуації баричний градієнт може не формуватися. Якоюсь мірою натяк на це природне явище описаний у нашій публікації “Фізичні механізми вирівнювання баричних градієнтів в атмосфері” [26]. Як аргумент, що побічно підтверджує дану тезу, є карти конвергенції та дивергенції повітряних потоків у верхніх шарах атмосфери на рівні 200 гПа. В серпні над Індією зазвичай фіксується дивергенція, а в січні-конвергенція (рис. 1).



а.



б.

Рисунок 1 – Дивергенція та конвергенція над Індією на рівні 200 гПа: а) у серпні, б) у січні [27].

Таким чином, мусонні вітри в Індійському океані виникають тільки тоді, коли маса повітря перестає бути скомпенсованою аномалією  $\Delta g$ , тобто, коли зі зміною  $\Delta g$  змінюється вага повітря. Наприклад, мусонна циркуляція в атмосфері Аравійського моря активізується в процесі змін  $\Delta g$ , а за умов екстремума  $\Delta g$  рухи повітряних мас не генеруються [25].

**Невирішені проблеми.** У перелічених дослідженнях декларовано, що мусонний клімат Аравійського моря та західної частини півострова Індостан формується змінами ваги маси атмосферного повітря між морем та суходолом за рахунок змін  $\Delta g$  в межах регіону, що характеризується стабільним у просторі від'ємним екстремумом  $\Delta g$  (рис. 2).

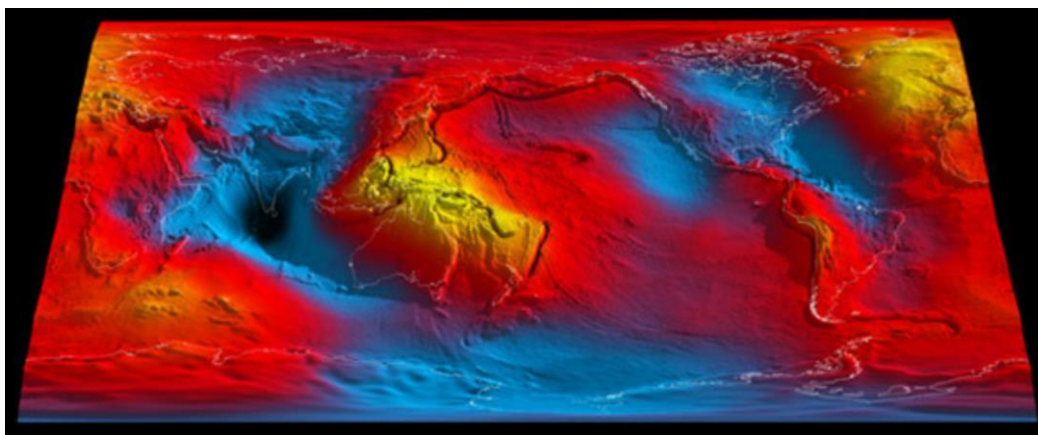


Рисунок 2 - Карта-схема гравітаційного поля Землі [28].

У монографіях [29-30] наведено епізод всебічного стискання Африканської тектонічної плити та генерації аномальних погодних умов в межах Африканського континенту у листопаді 2001 – лютому 2002 року. Було доведено, що протягом двох місяців, щоденно, над Сахараю та над Аравійським півостровом відбувалося незвичайне погодне явище - конденсація водяної пари у приземному повітрі у холодний термін часу доби (рис. 3).

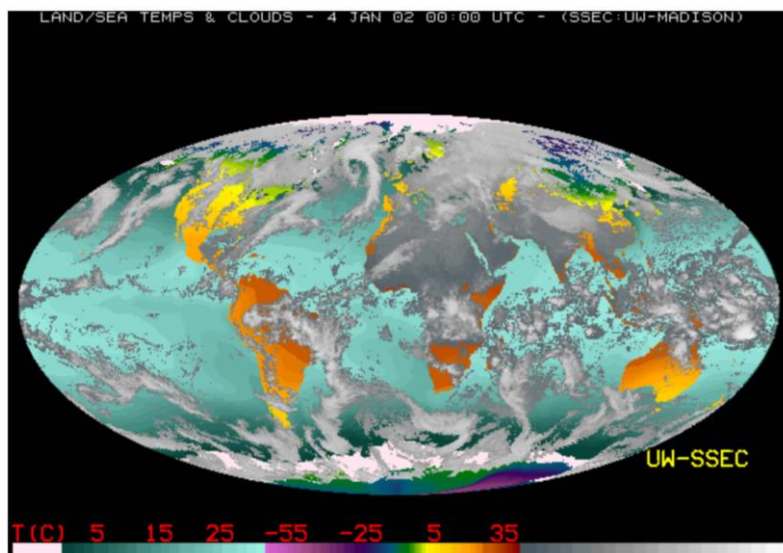


Рисунок 3 - Відображення процесу стиснення Африканської плити під час екстремальних геодформацій 13.11.2001-18.01.2002 р. [29].

В результаті аналізу сейсмічності у зонах спредингу навкруги Африканської тектонічної плити у листопаді 2001 – лютому 2002 року, було встановлено, що спочатку відбувалося рівномірне (з усіх сторін) стискання тектонічної плити, а у січні 2002 року активувався спрединг з північно-західної та південно-східної сторін континенту, що призвело до припинення тиску, шляхом активізації Східно-Африканського рифту. Це проявилось 19 січня 2002 р. виверженням вулканів зазначеного рифту. Одночасно (раптово) припинилися і погодні аномалії. У наших наукових працях [31,32] це природне явище пояснюється з позицій гідрогеології, що стосується аномалій гідрогеодеформаційного поля Землі в умовах потужних геодформацій. Це підтверджується результатами наукових досліджень, що були нещодавно отримані і наведені у роботі [33]. Нами було проведено додаткове дослідження зазначеної аномалії і встановлено, що аномальне погодне явище конденсації водяної пари у приземному повітрі у холодний термін часу доби охоплювало і півострів Індостан. Цей факт опосередковано підтверджує, що геодинамічні процеси, пов'язані з Африканською тектонічною плитою є впливовими на геодинамічні процеси у Індоокеанському регіоні. Нами констатовано, що процеси стискання Африканської плити у листопаді 2001- січні 2002 р. передували, тобто могли бути причиною, найпотужнішої за 35 років посухи в Індії у 2002 році (рис. 4).

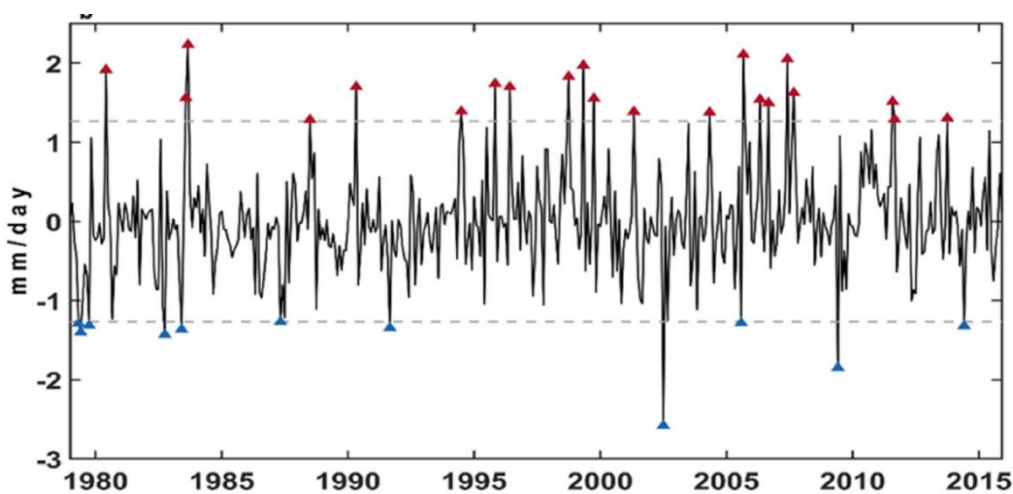


Рисунок 4 - Атмосферні опади в Індії (осереднені за місяць добові показники опадів (пунктирні лінії позначають 2 СКВ) у зоні прямокутника 10°N–30°N та 60°E–95°E [33].

На рис. 4 показано що у 2002 році посуха під час зимового мусону опустилася нижче статистичного показника - практично до 3-х середньоквадратичних відхилень (СКВ).

Слід зазначити, що у монографії [11] кліматична аномалія у Південній Атлантиці, що проявлена відсутністю тропічного циклогенезу, також пояснюється аномальними геодинамічними процесами, що відбуваються під Південно-Американською плитою, і через просторово-часові зміни гравітаційного поля впливають на поле атмосферного тиску та формують відповідні особливості тропічного циклогенезу в регіоні. За умов аномального за швидкістю руху тектонічної плити Наска під Південно-Американську плиту, остання на східному фланзі занурюється, що на регіональному рівні зменшує  $\Delta g$ . Зазначені процеси руйнують типові для тропічної зони умови високого атмосферного тиску, що блокує процес перетворення конвективних комірок у тропічні циклони [34].

Враховуючи те, що просторові варіації гравітаційного поля Землі формуються процесами, що відбуваються у надрах Землі, були проаналізовані загальні характеристики плитової тектоніки Землі (рис. 5).

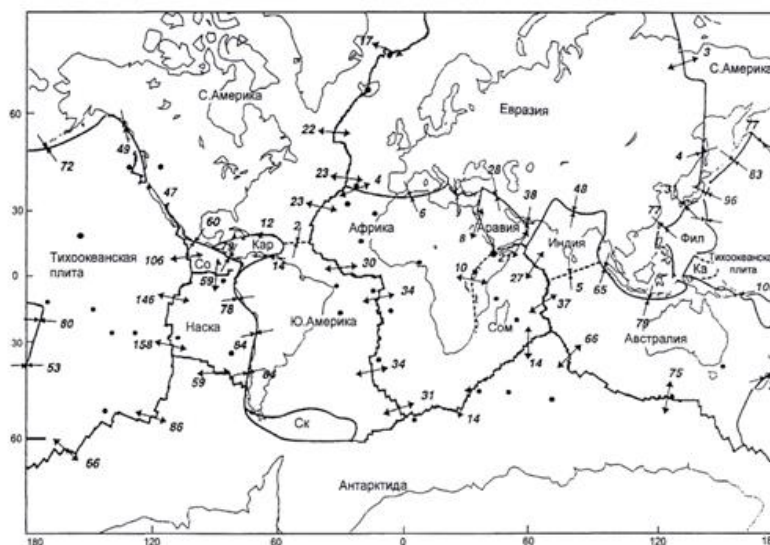


Рисунок 5 – Карта плитової тектоніки Землі [35].

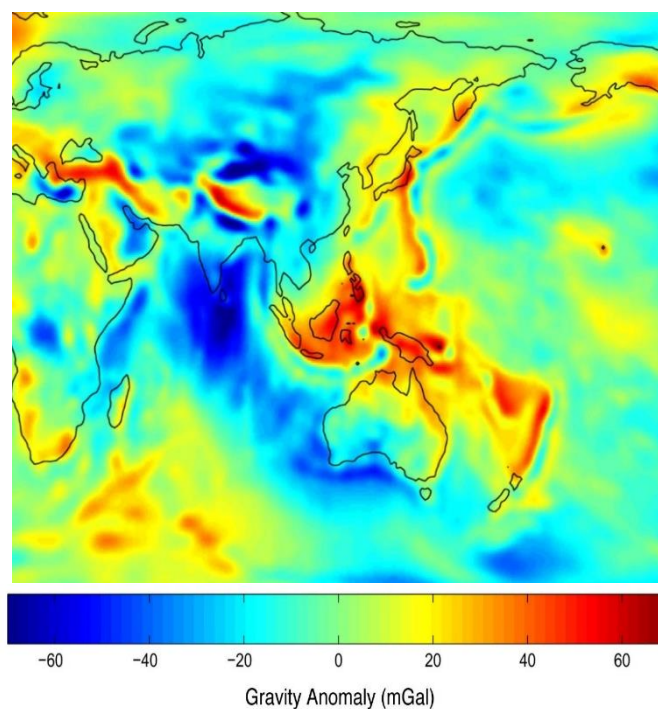
На рисунку 5 можна побачити, що Африканська тектонічна плита, на відміну від інших тектонічних плит, не має зони субдукції, тобто, у жодному місці Африканська плита не підсувається під сусідню тектонічну плиту. Це порушує принцип ізостазії. За умов стиснення Африканської плити, вона вимушена підійматися [30].

Лише декілька років тому у роботі [36] було встановлено, що від'ємна аномалія  $\Delta g$  у Індійському океані пов'язана з процесами під Африканською тектонічною плитою. Аномалія низької щільності мантії, яка простягається з глибини 300 км аж до ~900 км у північній частині Індійського океану походить від гарячого матеріалу, який піднімається з глибокої мантії під Африкою та рухається на північний схід. Тобто результати досліджень, що опубліковані у роботі [36] опосередковано підтверджують те, що аномальний зимовий мусон 2002 року і пов'язана з ним екстремальна посуха може бути викликана аномальними геодинамічними процесами, які проявилися у незвичайних погодних умовах, що показані на рисунках 3,4.

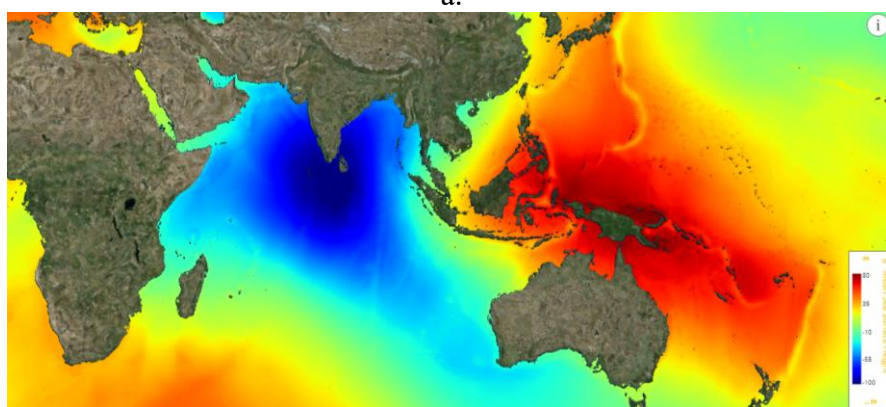
**Методи досліджень.** Метою нашого дослідження є підтвердження методами фізико-статистичного моделювання тези, опублікованої у роботах [24,25], стосовно того, що часові зміни форми геоїду в Аравійському морі (як одна з причин виникнення сезонних вітрів) відбуваються під впливом змін гравітаційного поля Землі. Підставою для цього є те, що під час зимового мусону, коли біля західного берега півострова Індостан під впливом згінного вітру повинна формуватися від'ємна аномалія рівня моря, формується позитивна аномалія форми геоїду, а під час літнього

мусону, за умов нагінного вітру повинна формуватися позитивна аномалія рівня моря, а формується від'ємна аномалія форми геоїду [25].

На рисунку 7 наведено карти аномалій гравітаційного поля Землі (мГал) [37] та аномалій форми геоїду (м) [38] у Індійському океані. Таким чином, аномалія  $\Delta g$  обумовлює аномалію середнього рівня океану.



а.



б

Рисунок 6 – Карти: а) аномалії гравітаційного поля Землі (мГал) [37],  
б) аномалії форми геоїду, тобто, середній рівень моря (м) [38].

В роботі [24] показано, що найбільш виражена мусонна циркуляція (в Індійському океані в районі Аравійського моря) просторово узгоджується з найбільш масштабною аномалією гравітаційного поля, що досягає 66 mGal. [39], що відповідає  $\Delta g = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$ .

Для отримання оцінки сезонної мінливості рівня моря та сезонної мінливості  $\Delta g$  біля західного берега півострова Індостан, були використані дані супутникової альтиметрії [38] та супутникової гравіметрії [40]. Слід зазначити, що фізичний принцип супутникової альтиметрії принципово відрізняється від фізичного принципу супутникової гравіметрії.

Для перевірки твердження стосовно впливу просторово-часових змін гравітації на динаміку рухомих оболонок Землі (на просторово-часові зміни рівня моря) в кліматичній зоні мусонів Індійського океану були використані дані географічних інформаційних систем. Це AVISO+, що використовує дані вимірювань рівня моря супутниковими альтиметрами та дані, отримані в

результаті виконання супутникової програми GRACE (вимірювання  $\Delta g$ ), отримані супутниками, що мають інші орбіти та інші фізичні принципи вимірювань. Тобто, методи та засоби вимірювань відрізняються [41,42].

За результатами осереднених за місяць вимірювань рівня моря та  $\Delta g$  біля узбережжя Індійської провінції Гоа отримано відповідні часові ряди (рис. 7) довжиною 15 років (2002-2017 рр.).

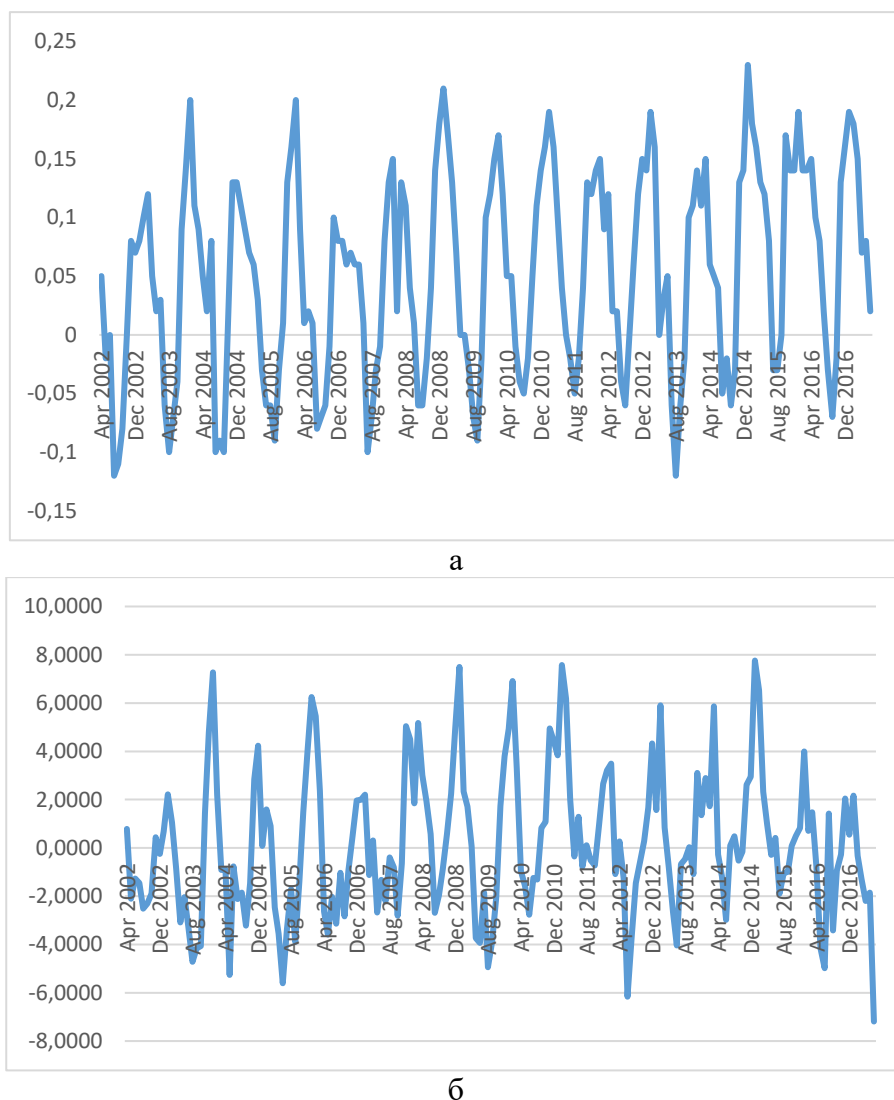


Рисунок 7 – Графіки змін у часі: а) форми геоїду та б) гравітації (район західного узбережжя півострова Індостан (провінція Гоа, Індія)).

Дані вимірювань рівня моря біля провінції Гоа підтвердили твердження [25], що всупереч дії вітру щорічно взимку рівень моря вищий, а влітку - нижчий.

Критерієм порівняння даних супутникової альтиметрії та гравіметрії обрано порівняння відповідних амплітудних спектрів альтиметрії та гравіметрії, та взаємного амплітудного, фазового спектрів та спектру когерентності.

**Отримані результати.** За результатами наших попередніх досліджень в [25] обговорювалось питання наявності залежності між регіональними змінами  $\Delta g$  і рівнем моря, як характеристики форми геоїда. Зазначена теза досі не була підтверджена на кількісному рівні. На нашу думку, за наявності кількісних доказів впливу змін гравітаційного поля на гідросферу (на рівень моря) в районі потужної гравітаційної аномалії в Індійському океані, виникнуть підстави вважати, що зміни  $\Delta g$  впливають і на атмосферні процеси. Завдяки тому, що зміни  $\Delta g$  відбуваються з річним циклом,

як і мусонні вітри, виникають підстави для більш детального аналізу впливу змін  $\Delta g$  на баричне поле, поле вітру та поле вітрових хвиль. Нами було використано результати супутникового експерименту з вимірювань змін топографії поверхні океану (AVISO+) та вимірювань регіональних змін гравітаційного поля Землі (GRACE). Оцінка змін гравітаційного поля та висоти геоїду отримувалася щомісячно. У якості району досліджень нами обрано район західного узбережжя півострову Індостан (провінція Гоа, Індія), де сезонна мінливість мусонного клімату (вітер та хвилі) додатково підтверджується мінливістю кількості атмосферних опадів.

Були обчислені часові ряди змін рівня Аравійського моря та змін  $\Delta g$  у Аравійському морі. Оцінка коефіцієнту кореляції між двома часовими рядами складає  $R=0,73$ . Аналіз даних, наведених на рисунку 7, свідчить про наявність періодичної складової у мінливості форми геоїду та  $\Delta g$ .

Дані змін гравітаційного поля та форми геоїду можуть бути представлені у часовій та частотній областях. Амплітудний спектр отримується шляхом задіяння до часового ряду процедури швидкого перетворення Фур'є. Для оцінки існуючих періодичностей змін гравітаційного поля Землі та змін форми геоїду Землі було розраховано відповідні амплітудні спектри (рис. 8).

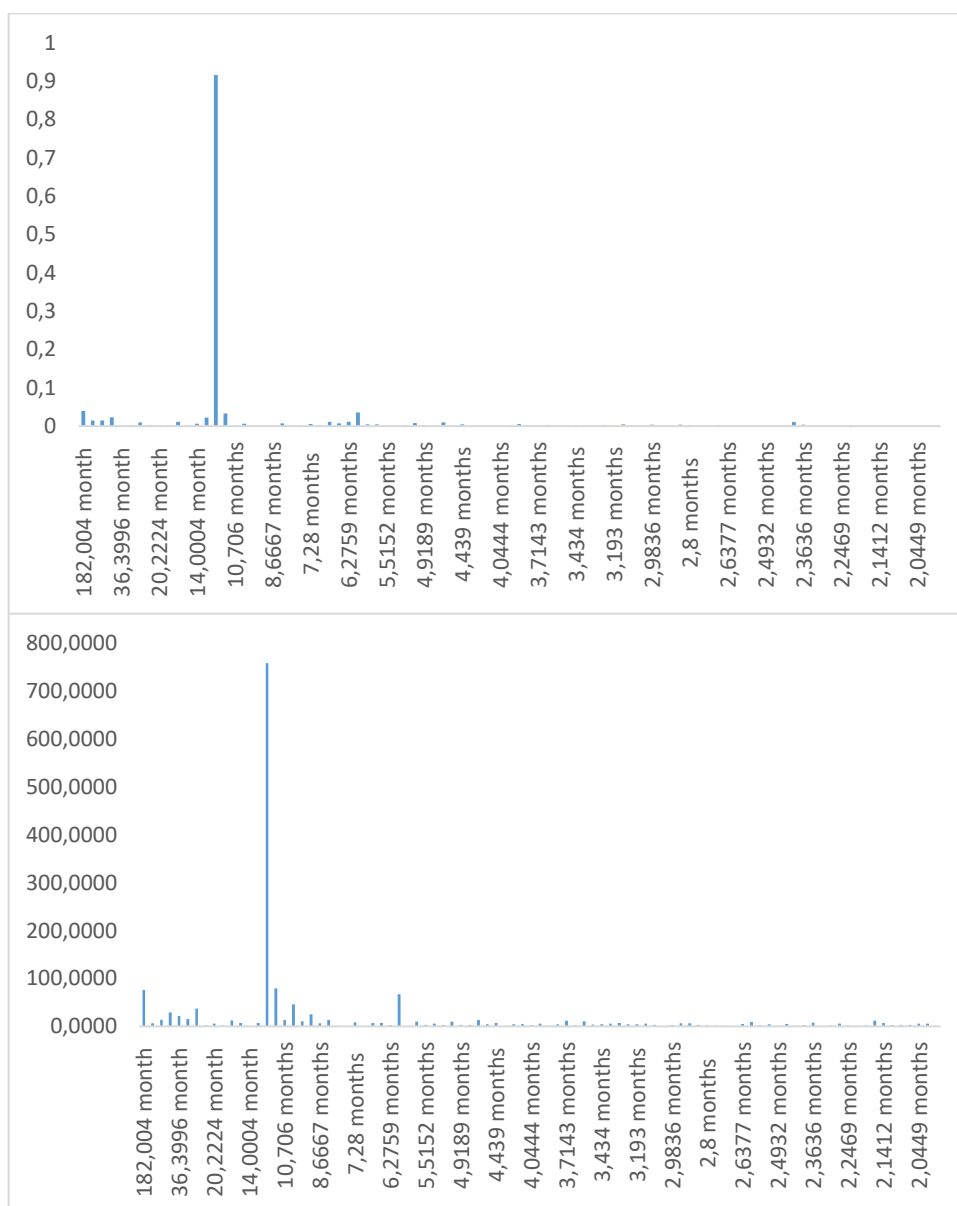


Рисунок 8 – Графіки амплітудного спектру змін гравітаційного поля (а) і спектру змін форми геоїду Землі (б) в районі західного узбережжя півострова Індостан (провінція Гоа, Індія).

У районі досліджень в Індійському океані за умов від'ємної аномалії гравітаційного поля зафіксована депресія поверхні океану, що може досягати глибини 102 метра і є динамічною. За даними розрахунку амплітудного спектру часових змін гравітаційного поля Землі, у зазначеному регіоні виділяється періодична складова - період 1 рік (рис. 8а). За даними розрахунку амплітудного спектру змін форми геоїду Землі також виділяється річна періодична складова (рис. 8б).

З метою визначення ідентичності річної мінливості гравітаційного поля та річної мінливості форми геоїду в обраному регіоні були виконані розрахунки оцінок кроспектру, фазового спектру та спектру когерентності (рис. 9).

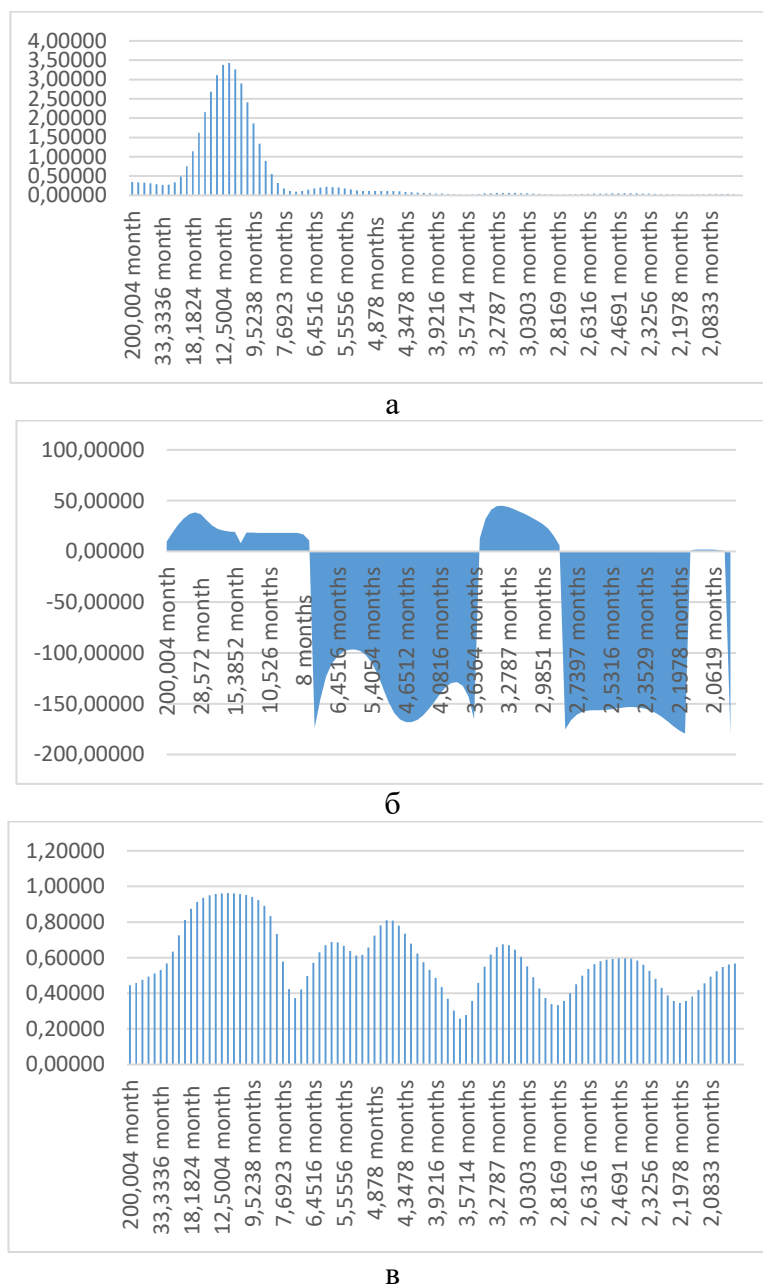


Рисунок 9 – Графіки розрахунку оцінок: а) кроспектру, б) спектру зміни фаз та в) спектру когерентності в районі західного узбережжя півострову Індостан (провінція Гоа, Індія).

В результаті виконаних досліджень вперше зафіксовано високий рівень когерентності річних гармонік змін гравітаційного поля і змін форми геоїду в районі найпотужнішої аномалії  $\Delta g$ , де щорічно виникають найпотужніші мусони.

Для річного періоду отримано кількісні характеристики: кроспектру - 3,5, спектру фазових зсувів -  $18^\circ$ ; спектру когерентності - 0,96.

**Висновок.** В результаті аналізу умов виникнення мусонних вітрів у Індокоеанському регіоні, який характеризується найпотужнішою аномалією гравітаційного поля Землі, прийнято до уваги те, що зміни  $\Delta g$  можуть викликати (бути причиною) рухів атмосферного повітря [9]. Це актуалізувало дослідження причин виникнення аномалії гравітаційного поля Індокоеанського регіону і було знайдено її пояснення глибинними процесами під Африканською тектонічною плитою [36]. Опосередковано, через аномальні погодні умови у листопаді 2001 – січні 2002 отримано підтвердження впливу Африканських тектонічних процесів на Індокоеанські геодинамічні процеси включно з аномалією гравітаційного поля.

Для забезпечення безпеки мореплавства потрібні методики прогнозування початку та закінчення “сезону” несприятливих погодних умов у зазначеному регіоні. Це потребує створення теорії мусонних вітрів та чисельних розрахунків просторово-часової мінливості літнього мусону. На кількісному рівні отримано підтвердження співпадіння змін  $\Delta g$  з динамікою рідкої оболонки Землі в районі Індокоеанської аномалії. За супутниковими даними про зміни у часі гравітаційного поля Землі (міжнародний проєкт GRACE) та топографії поверхні океану (міжнародний проєкт AVISO) отримано кількісні оцінки наявності статистично значимого зв'язку часових змін топографії поверхні океану у Аравійському морі зі змінами гравітаційного поля. По-перше, встановлено наявність прямо пропорційної залежності між змінами сили тяжіння і рівня океану в районі Аравійського моря. По-друге, визначено, що гравітаційне поле і форма геоїду змінюються у часі виключно з річними циклами. По-третє, встановлено, що так звані, “сезонні” зміни зазначених полів когерентні, але мають незначний зсув за фазою.

Таким чином, на кількісному рівні вперше було підтверджено, що в районі Індокоеанської гравітаційної аномалії з мусонним типом клімату рідка (рухома) оболонка Землі коливається синхронізовано зі змінами  $\Delta g$ .

## ЛІТЕРАТУРА

1. Дегтярев А.И. Муссоны в системе глобальной циркуляции атмосферы: диагностика и моделирование: автореф. дис. док. фیز-мат. наук. 2004. URL: <https://www.dissercat.com/content/mussony-v-sisteme-globalnoi-tsirkulyatsii-atmosfery-diagnostics-i-modelirovanie> (дата звернення 10.09.2024).
2. Воейков А.И. и современные проблемы климатологии. Збірник статей ред. Будыко М.И. Л.: Гидрометеорологическое изд-во. 1956. 282 с.
3. Дроздов О.А., Сорочан О.Г. Краткий обзор работ, выполненных в России и СССР по характеристике муссонов. *Труды ГГО*. Вып. 111. 1961. С. 49-63.
4. Сорочан О.Г. Муссоны Азии. В кн. *Современные проблемы климатологии*. - Л.: Гидрометеиздат. 1966. 450 с.
5. Осмаловская Е.В., Дмитриев А.А., Гутман Л.Н., Монин А.С. Риль Г. Современные проблемы климатологии. Л.: Гидрометеорологическое изд-во. 1966. 450 с.
6. Рамедж К. Метеорология муссонов. Л.: Гидрометеиздат. 1976. 335 с.
7. Риль Г. Климат и погода в тропиках. Л.: Гидрометеиздат. 1984. 605 с.
8. Тропические муссоны. ред. Петросянца М.А., Белова П.Н. ПГЭП, Т. 9. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 338 с.
9. Руткевич, П.Б. О реакции атмосферы на локальные изменения плотности мантии Земли. *Гидродинамика*. Збірник наукових праць. Вип. 11. 1998. С. 241–248.
10. Бороздич, Э. В. Воздействие короткоживущих подкорковых локальных возмущений на лито-, гидро-и атмосферу. Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации. монографія: Наука. 1990. С. 130–140.
11. Гладких І. І. Капочкін Б.Б., Кучеренко Н. В., Лісоводський В. В. Формування погодних умов в морських та прибережних районах. Одеса: Астропринт, 2007. 142 с.

12. Капочкін Б.Б., Доля В.Д. Атмосферні процеси як відображення гравітаційного поля та його мінливості. зб. матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції - І-й Всеукраїнський з'їзд екологів. 2006. Вінниця: ВНТУ. 2006. С. 50.
13. Конкін В.В., Капочкін Б.Б., Доля В.Д. Вплив геодинамічних процесів на атмосферну циркуляцію. *Географія і сучасність*. Науковий часопис національного педагогічного університету імені М.П. Драгоманова. серія 4. Вип. 19. Київ. 2008.С. 37-44.
14. Dolia V. D. The gravitational theory of baric formations. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 10, EGU2008-A-11100. 2008.
15. Dolia V. D. Basic mechanism of interaction of a gravitational field of the Earth and atmospheric circulation. International conference Global and regional climate changes, conference abstracts, 2010. Kyiv. С. 16-19.
16. Доля В.Д. Капочкін Б.Б. Вплив геофізичних полів на атмосферні процеси - вплив геофізичних полів на атмосферні процеси. Конференція: III-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю. Вересень 2012. DOI:10.13140/RG.2.1.4484.5921.
17. Доля В.Д. Механізм взаємодії гравітаційного поля та атмосферної циркуляції планети: Зб. наук. пр. IX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Випуск IX. Київ. 2013. 330 с.;
18. Доля В.Д. Гравитационное поле – фундаментальный климатообразующий фактор циркуляции атмосферы планеты. Всероссийская научная интернет-конференция с международным участием – “Современное понимание Солнечной системы и открытые вопросы”. Казань. 2014. С. 36-37.
19. Доля В. Д. Гравітаційне поле - основа циркуляції атмосфери планети. 15 українська конференції з космічних досліджень НАН України: тези доповіді. Одеса, 24-28 серпня 2015. с. 16.
20. Спосіб виявлення змін гравітаційного поля Землі: Пат. № 63796 Україна. Опубліковано 25.10.2011. Бюл. N 20.
21. A New Global Mode of Earth Deformation: Seasonal Cycle Detected. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1065328> (дата звернення 12.09.2024).
22. 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.
23. Доля В. Д., Кучеренко Н. В., Капочкин Б. Б. Влияние временной изменчивости гравитационного поля на атмосферу и океан. *Scientific Journal “ScienceRise”*. Том 2 № 1 (7) 2015, С. 30-34 URL: <https://journals.urau.ua/sciencerrise/article/view/37631> DOI: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.37631> (дата звернення 12.09.2024)
24. 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](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh_2015_12_11)] (дата звернення 12.09.2024)
25. 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.
26. National Weather Service Climate Perdition Centre URL:<http://www.cpc.noaa.gov> дата звернення (14.09.2024).
27. Most Accurate Gravity Map Of The Earth URL: [https://www.behance.net/gallery/2290102/ixtract-Most-Accurate-Gravity-Map-Of-The-Earth?locale=ru\\_RU](https://www.behance.net/gallery/2290102/ixtract-Most-Accurate-Gravity-Map-Of-The-Earth?locale=ru_RU) (дата звернення 15.09.2024).
28. Войтенко С.П., Учитель И.Л., Ярошенко В.Н., Капочкин Б.Б. Геодинамика. Основы кинематической геодезии, Одесса: Астропринт, 2007. — 259 с.
29. Учитель И.Л., Ярошенко В.Н., Капочкин Б.Б. Геодинамика. Основы динамической геодезии. под ред. Войтенко С. П. Одесса: Астропринт, 2008, 311 с.

30. Kapochkin A., Kapochkin B., Kucherenko N., Uchytel I. Floods and droughts as a result of deformability of the geological environment Meteorology Hydrology and Water Management. 3(2), p. 3-7. DOI: <https://doi.org/10.26491/mhwm/58810>
31. Гнатюк М. В., Кучеренко А. В., Капочкіна А. Б., Доля В. Д. “Гидрогеодинамический эффект” и наводнения: зб. наук. праць XI Науково-практичної конференції Шевченківська весна – 2013: географія. Випуск XI. Київ, 18-22 бер. URL: <https://www.researchgate.net/publication> (дата звернення 16.09.2024).
32. Pao-Wei Huang, Yong-Fu Lin & Chau-Ron Wu Impact of the southern annular mode on extreme changes in indian rainfall during the early 1990s. Scientific Reports. volume 11, Article number: 2798 (2021) URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-82558-w> (дата звернення 16.09.2024).
33. Капочкіна А.Б., Капочкін Б.Б. Влияние газовой составляющей флюидного режима литосферы в районах акваторий на атмосферные процессы. Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. Т. 4. Вип. 1 2013 22 с. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-gazovoy-sostavlyayuschey-flyuidnogo-rezhima-litosfery-v-rayonah-akvatoriy-na-atmosfernye-protssy> (дата звернення 10.10.2024).
34. Скорости и направления движения плит. URL: <https://studbooks.net/1787298/geografiya/> (дата звернення 10.10.2024).
35. Attreyee Ghosh, G. Thyagarajulu, Bernhard Steinberger The Importance of Upper Mantle Heterogeneity in Generating the Indian Ocean Geoid Low. Geophysical Research Letter. October 2017 URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley>. <https://doi.org/10.1002/2017GL075392> (дата звернення 10.10.2024).
36. Nasa gravity map of earth URL:<https://mapofsouthwesternontario.pages.dev/posts/nasa-gravity-map-of-earth> (дата звернення 20.10.2024).
37. Seewater aviso altimetry URL:<https://seewater.aviso.altimetry.fr/#/> (дата звернення 20.10.2024).
38. How precise is Earth's gravity URL:<http://www.calpoly.edu/~gthornsr> (дата звернення 20.10.2024).
39. NASA: спутники выявили резкое снижение уровня пресной воды во всем мире URL:<https://www.ixbt.com/news/2024/11/18/nasa-sputniki-vyjavili-rezkoe-snizhenie-urovnja-presnoj-vody-vo-vsem-mire.html> (дата звернення 10.11.2024).
40. Гладких І.І., Симоненков С.В., Михайлов В.І., Кучеренко Н.В., Капочкіна М.Б., Барган О.Г., Чеча О.П. Перспективи розвитку оперативної океанографії в Україні.
41. Гладких І.І., Капочкіна М.Б., Кучеренко Н.В. Капочкін Б.Б. Нова парадигма формування акумулятивного рельєфу мілководних ділянок океанів і морів. Том 3. Раніше невідомі аспекти формування клімату, погоди, в тому числі природні небезпеки: монографія – Одеса : НУ "ОМА", 2021. 199 с.

## REFERENCES

1. Degtyarev A.I. Monsoons in the global atmospheric circulation system: diagnostics and modeling: abstract of doctoral dissertation physics and mathematics of science 2004. URL: <https://www.dissercat.com/content/mussony-v-sisteme-globalnoi-tsirkulyatsii-atmosfery-diaagnostika-i-modelirovanie> (date of application 10.09.2024).
2. Voeikov A.I. and modern problems of climatology. Collection of articles edited by Budyko M.I. Hydrometeorological Publishing House. 1956. 282 p.
3. Drozdov O.A., Sorochan O.G. Brief overview of works carried out in Russia and the USSR on the characteristics of monsoons. Proceedings of the GTO. Issue 111. 1961. 49-63 p.
4. Sorochan O.G. Monsoons of Asia. In the book Modern Problems of Climatology. - L: Gidrometeoizdat. 1966. 450 p.
5. Osmalovskaya E.V., Dmitriev A.A., Gutman L.N., Monin A.S. Ril G. Modern problems of climatology. JL: Hydrometeorological publishing house. 1966. 450 p.
6. Ramage K. Monsoon meteorology. JL: Hydrometeoizdat. 1976. 335 p.

7. Ril G. Climate and weather in the tropics. L.: Gidrometeoizdat. 1984. 605 p.
8. Tropical monsoons. edited by Petrosyants M.A., Belov P.N. T. 9. L.: Gidrometeoizdat. 1988. 338 p.
9. Rutkevich, P.B. On the reaction of the atmosphere to local changes in the density of the Earth's mantle. *Hydrodynamics*. Collection of scientific works. Issue 11. 1998. P. 241–248.
10. Borozdich, E. V. Impact of short-lived subcortical local disturbances on the litho-, hydro- and atmosphere. Gagarin Scientific Readings on Cosmonautics and Aviation. Monograph: Science. 1990. P. 130–140.
11. Gladkikh I. I. Kapochkin B.B., Kucherenko N.V., Lisovodsky V.V. Formation of weather minds in sea and coastal areas. Odessa: Astroprint, 2007. 142 p.
12. Kapochkin B.B., Dolya V.D. Atmospheric processes such as the reflection of the gravitational field and its flow. zb. materials of the International Scientific and Practical Conference - 1st All-Ukrainian Congress of Ecologists. 2006. Vinnytsia: VNTU. 2006. P. 50.
13. Konkin V.V., Kapochkin B.B., Dolya V.D. Influx of geodynamic processes on atmospheric circulation. Geography and reality. Scientific record of the National Pedagogical University named after M.P. Dragomanova. episode 4. VIP. 19. Kiev. 2008. pp. 37-44.
14. Dolia V. D. The gravitational theory of baric formations. Geophysical Research Abstracts. Vol. 10, EGU2008-A-11100. 2008.
15. Dolia V. D. Basic mechanism of interaction of a gravitational field of the Earth and atmospheric circulation. International conference Global and regional climate changes, conference abstracts, 2010. Kyiv. C. 16-19.
16. Dolya V.D. Kapochkin B.B. The influence of geophysical fields on atmospheric processes - the influence of geophysical fields on atmospheric processes. Conference: III All-Ukrainian Congress of Ecologists with International Participation. September 2012. DOI:10.13140/RG.2.1.4484.5921.
17. Dolya V.D. Mechanism of interaction between the gravitational field and atmospheric circulation of the planet: Collection of scientific works of the IX All-Ukrainian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists. Issue IX. Kyiv. 2013. 330 p.
18. Dolya V.D. Gravitational field – a fundamental climate-forming factor of the planet's atmospheric circulation. All-Russian scientific Internet conference with international participation – “Modern understanding of the Solar system and open questions”. Kazan. 2014. P. 36-37.
19. Dolya V. D. Gravitational field - the basis of the circulation of the planet's atmosphere. 15th Ukrainian Conference on Space Research of the NAS of Ukraine: abstracts. Odesa, August 24-28, 2015. p. 16.
20. Method for detecting changes in the Earth's gravitational field: Pat. No. 63796 Ukraine. Published 10/25/2011. Bulletin No. 20.
21. A New Global Mode of Earth Deformation: Seasonal Cycle Detected. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1065328> (date of application 12.09.2024).
22. Dolya V.D. Monsoons, as part of the global circulation of the Earth's atmosphere, the geophysical nature of the phenomenon. Collection of scientific works of the XII International scientific interdisciplinary conference of students, postgraduates and young scientists “Shevchenko Spring – 2014, Part 3: geography”: abstracts of the report. Issue XII. Kyiv, 18-22 Mar. 2014. P.93.
23. Dolya V. D., Kucherenko N. V., Kapochkin B. B. Influence of temporal variability of the gravitational field on the atmosphere and ocean. Scientific Journal "ScienceRise". Volume 2 No. 1 (7) 2015, p. 30-34 URL: <https://journals.urau/sciencerise/article/view/37631> DOI: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.37631> (date of application 12.09.2024)
24. Kolesnyk A. V., Dolya V. D., Kucherenko N. IN. The use of GIS to study the causes of the formation of monsoons in the Indian Ocean. Journal of cartography. 2015. Issue 12. pp. 82-89. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh\\_2015\\_12\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh_2015_12_11) (date of application 12.09.2024)
25. Kapochkin B. B., Kucherenko N. V., Lisovodsky V. V., Konkin V. V. Physical mechanisms of equalization of baric gradients in the atmosphere. K., 2003. 12 p. Dep. in the State Scientific and Technological Research Council of Ukraine 04.08.03, No. 105.

26. National Weather Service Climate Prediction Centre URL:<http://www.cpc.noaa.gov> (date of application 14.09.2024).
27. Most Accurate Gravity Map Of The Earth URL: [https://www.behance.net/gallery/2290102/extract-Most-Accurate-Gravity-Map-Of-The-Earth?locale=ru\\_RU](https://www.behance.net/gallery/2290102/extract-Most-Accurate-Gravity-Map-Of-The-Earth?locale=ru_RU) (date of application 15.09.2024).
28. Voitenko S.P., Uchitel I.L., Yaroshenko V.N., Kapochkin B.B. Geodynamics. Fundamentals of kinematic geodesy, Odessa: Astroprint, 2007. — 259 p.
29. Uchitel I.L., Yaroshenko V.N., Kapochkin B.B. Geodynamics. Fundamentals of dynamic geodesy. edited by Voitenko S.P. Odessa: Astroprint. 2008. 311 p.
30. Kapochkin A., Kapochkin B., Kucherenko N., Uchitel I. Floods and droughts as a result of deformability of the geological environment Meteorology Hydrology and Water Management. 3(2), p. 3-7. DOI: <https://doi.org/10.26491/mhwm/58810>
31. Hnatyuk M. V., Kucherenko A. V., Kapochkina A. B., Dolya V. D. "Hydrogeodynamic effect" and floods: collection of scientific papers of the XI Scientific and Practical Conference Shevchenko Spring – 2013: geography. Issue XI. Kyiv, March 18-22. URL: [https://www.researchgate.net/publication/281114732\\_Hydrogeodynamic\\_effekta\\_and\\_floods\\_-\\_Gidrogeodinamiceskij\\_effekt\\_i\\_navodnenia?channel=doi&linkId=55d6de7808aeb38e8a841ece&showFulltext=true](https://www.researchgate.net/publication/281114732_Hydrogeodynamic_effekta_and_floods_-_Gidrogeodinamiceskij_effekt_i_navodnenia?channel=doi&linkId=55d6de7808aeb38e8a841ece&showFulltext=true) (date of application 16.09.2024).
32. Pao-Wei Huang, Yong-Fu Lin & Chau-Ron Wu Impact of the southern annular mode on extreme changes in indian rainfall during the early 1990s. Scientific Reports. volume 11, Article number: 2798 (2021) URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-82558-w> (date of application 16.09.2024).
33. Kapochkina A.B., Kapochkin B.B. The influence of the gas component of the fluid regime of the lithosphere in the water areas on atmospheric processes. The electronic scientific publication Almanac Space and Time. T. 4. Issue 1. 2013. 22 p. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-gazovoy-sostavlyayuschey-flyuidnogo-rezhima-litosfery-v-rayonah-akvatoriy-na-atmosfernye-protsessy> (date of application 10.10.2024).
34. Speeds and directions of plate movement. URL: <https://studbooks.net/1787298/geografiya> (date of application 10.10.2024).
35. Attreyee Ghosh, G. Thyagarajulu, Bernhard Steinberger The Importance of Upper Mantle Heterogeneity in Generating the Indian Ocean Geoid Low. Geophysical Research Letter. October 2017 URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley> <https://doi.org/10.1002/2017GL075392> (date of application 10.10.2024).
36. Nasa gravity map of earth URL:<https://mapofsouthwesternontario.pages.dev/posts/nasa-gravity-map-of-earth> (date of application 20.10.2024).
37. Seewater aviso altimetry URL:<https://seewater.aviso.altimetry.fr/#!> (date of application 20.10.2024).
38. How precise is Earth's gravity URL:<http://www.calpoly.edu/~gthorncr/ME302/> (date of application 20.10.2024).
39. NASA: Satellites have revealed a sharp decline in fresh water levels around the world URL:<https://www.ixbt.com/news/2024/11/18/nasa-sputniki-vyjavili-rezkoe-snizhenie-urovnja-presnoj-vody-vo-vsem-mire.html> (date of application 10.11.2024).
40. Gladkikh I.I., Symonenkov S.V., Mykhaylov V.I., Kucherenko N.V., Kapochkina M.B., Bargin O.G., Checha O.P. Prospects for the development of operational oceanography in Ukraine. Odesa: Astroprint, 2017 – 116 p.
41. Gladkikh I.I., Kapochkina M.B., Kucherenko N.V., Kapochkin B.B. A new paradigm of the formation of accumulative relief of shallow areas of oceans and seas. Volume 3. Previously unknown aspects of climate and weather formation, including natural hazards: monograph Odesa: National University "OMA", 2021. 199 p.

**Kucherenko N.V., Tomchakovsky G. G., Kapochkina M.B., Kalinichenko E.V.**

**CONDITIONS OF THE FORMATION OF MONSOON WIND OVER THE INDOCEAN GRAVITY ANOMALY**

*The tropical zone of the World Ocean is characterized by the practical absence of spatiotemporal changes in insolation, the absence of baric gradients, and as a result, the presence of a shift of atmospheric air from east to west with a speed of up to 6 m/s. This situation contributes to safe navigation. The exception is the water area of the northern part of the Indian Ocean, where from June to August, southwesterly winds are generated with a speed of more than 10 m/s, which form wind waves with a height of up to 7 m. To ensure the safety of navigation, methods for predicting the beginning and end of the "season" of adverse weather conditions are needed. This requires the creation of a theory of monsoon winds and numerical forecasts of the spatiotemporal variability of the summer monsoon. The paper analyzes existing hypotheses of the causes of the disruption of the trade wind circulation in the Indian Ocean region, and obtains numerous estimates of the impact on the moving shells of the Earth, using the example of a liquid shell, of the spatiotemporal changes  $\Delta g$ .*

**Keywords:** Monsoon wind, geoid, satellite altimetry, satellite gravimetry, physical and statistical modeling, navigational hydrometeorology, shipping safety.