

## УДК 550.311

А. ЦЕРКЛЕВИЧ, О. ЗАЯЦЬ, Є. ШИЛО

Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013 тел. (099)-95-41-434, ел. пошта shyloyevhenii@gmail.com

## ПРО НАПРУЖЕНИЙ СТАН ТЕКТОНОСФЕРИ ЗЕМЛІ

**Мета.** У науках про Землю широкого значення набувають планетарні задачі, які пов’язані з вивченням напруженого стану тектоносфери Землі. Мета цієї роботи показати, як упродовж еволюційного саморозвитку планети в результаті дії гравітаційно-ротаційних сил відбувається перерозподіл мас, що приводить до напруженого стану тектоносфери і як наслідок – до трансформації фігури її поверхні. Вирішуючи обернену задачу за параметрами еволюційних змін фігури поверхні літосфери, можна визначити діючі сили, які зумовлюють динаміку напруженого стану Землі. **Методика.** З попередніх досліджень авторів виявилось, що фігура поверхні літосфери повернута відносно фігури геоїда. Таке розміщення фігури літосфери і фігури геоїда може створювати напруження, яке спрямоване на узгодженість розподілу мас фігури геоїда. Вирішення цієї задачі розглянуто на прикладі апроксимації висот поверхні літосфери двовісним еліпсоїдом. Описаний алгоритм застосовується для апроксимації ЦМР ETOPO1. Висоти моделей осереднюються в межах трапецій  $5^\circ \times 5^\circ$  і на основі цих даних знаходять параметри двовісного еліпсоїда. Ввівши поняття “геоеволюційного” відхилення виска і припустивши, що тангенціальні сили пропорційні куту  $g$ , який визначається як кут між напрямком ліній виска в минулу геологічну епоху і нинішнім напрямком у заданій точці, можна розрахувати діючі сили у верхній оболонці планети. **Результати.** Запропоновано оригінальний алгоритм визначення тангенціальних сил і їхню інтерпретацію з позицій дослідження планетарної динаміки фігури Землі та глобального напруженого стану. **Наукова новизна.** Введено поняття “геоеволюційного” відхилення виска, на основі якого розраховані тангенціальні сили, що діють у верхній оболонці планети. Розглянуто інтерпретацію ролі гравітаційно-ротаційних сил у формуванні глобального поля напружень у тектоносфері Землі. **Практична значущість.** Подані результати використовуватимуться у подальших дослідженнях, які спрямовані на вивчення планетарних характеристик нашої планети, динаміки їхніх змін у часі та глобального напруженого стану.

*Ключові слова:* напружений стан тектоносфери, поверхня літосфери Землі, двовісний еліпсоїд, “геоеволюційне” відхилення виска, тангенціальні сили.

**Вступ**

Якщо розглядати Землю з позицій її структурної будови, в якій виділяють декілька оболонок з різними геологічними властивостями: літосфера, астеносфера, мантія, зовнішнє і внутрішнє ядро, то можна допустити, що під дією гравітаційних і ротаційних сил на внутрішні оболонки здійснюється різний вплив. Отож геодинамічну еволюцію Землі можна розглядати як наслідок перерозподілу її маси в силовому полі, що динамічно змінюється, а зовнішнім проявом цього процесу є фігура поверхні літосфери, яка повинна набувати форму з мінімальною потенційною енергією. Водночас, вочевидь, не можна не враховувати дію змінних сил, які визначають перебіг внутрішньоземних процесів, і спрямовані проти дії гравітаційних сил. Отже, дія цих протилежних сил формує загальне геодформаційне поле через деформацію топології поверхні планети і відповідної динамічної реакції, яка супроводжується перерозподілом мас. Залежно від фізико-механічних властивостей порід структурного середовища, величин і масштабів геометричних параметрів тектонічних форм і тривалості дії сил цей неперервний процес реакції має свою критичну межу напружень. Після досягнення критичної межі фігура планети трансформує свою

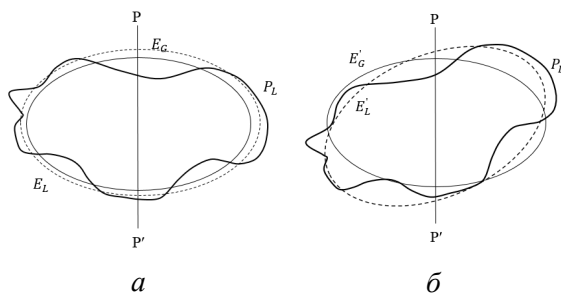
форму, а це призводить до того, що в різних напрямках на її поверхні можуть відбуватися руйнування у вигляді велетенських розломів, тріщинуватості регіонального масштабу, утворення лініаментних структур.

Якщо представити земну кулю без води, то виявимо, що рельєф земної поверхні істотно відрізняється від геоїда. Порівнюючи карту геоїда з тектонічними картами, приходимо до відомого висновку про відсутність зв’язку висот геоїда з тектонічними структурами. Висоти геоїда виявляють абсолютно незалежний розподіл навіть відносно найкрупніших тектонічних структур літосфери: континентальних виступів і океанічних западин. Це видима відсутність взаємозв’язку висот геоїда з будовою літосфери, вочевидь, є проявом негомтегічним розміщенням планетарних структур фізичної поверхні Землі відносно фігури геоїда, що може бути зумовлене переміщенням літосферних плит. Останнє може приводити до обертання всієї літосфери Землі щодо стійкішої фігури геоїда, що можливо відобразилося на відмінності значень параметрів і на орієнтуванні геометричних фігур, що апроксимують фізичну поверхню і геоїд.

Більшість гіпотез еволюції планет вказують, що в минулому Земля була ближче до гідростатичного стану, ніж зараз. Внаслідок цього зовнішня

поверхня літосфери збігалася з фігурою еліпсоїда, який найкраще описував геоїд. Відповідно, в той далекий період напрямом лінії виска збігався з напрямком нормалі до еліпсоїда, який апроксимував зовнішню поверхню літосфери. Схематичну ілюстрацію еволюційного формування фігури Землі показано на рис. 1, де введені такі позначення:  $PP'$  – вісь обертання,  $P_L$  – поверхня літосфери,  $E_L$  – еліпсоїд, який найкраще підходить до поверхні літосфери,  $E_G$  – еліпсоїд, який зображає фігуру Землі в далеку геологічну епоху; всі попередні позначення на рис. 1, а підписані зі штрихом на рис. 1, б для фігури та поверхні літосфери Землі в сучасну епоху.

Отже, якщо зіставити два положення зовнішніх оболонок Землі на рис. 1, а, б, то можна допустити виникнення напруженого стану через зміну швидкості обертання і положення осі обертання відносно її фігури. Розподіл напруг у літосфері Землі, який може виникнути в результаті трансформації фігури Землі, схематично показано на рис. 2. Таку схему розподілу напруг запропонував член-кореспондент НАН України К. Тяпкін для опису нової ротаційної гіпотези структуроутворення [Тяпкін К., 1982]. Під час одночасної зміни параметрів ротаційного режиму Землі (кутової швидкості і положення осі обертання) передбачено, що сповільнення обертання Землі викликає появу напруг у літосфері, розподіл яких зображено на рис. 2, а, а зміна положення осі обертання призводить до переорієнтування фігури й утворенню зон стиснення та розтягу, рис. 2, б. Фактичні геологічні дані свідчать про те, що значну роль у цьому відіграє тектонічний фактор, зумовлений переміщенням літосферних плит, які можуть впливати на зміну положення полюсів Землі.

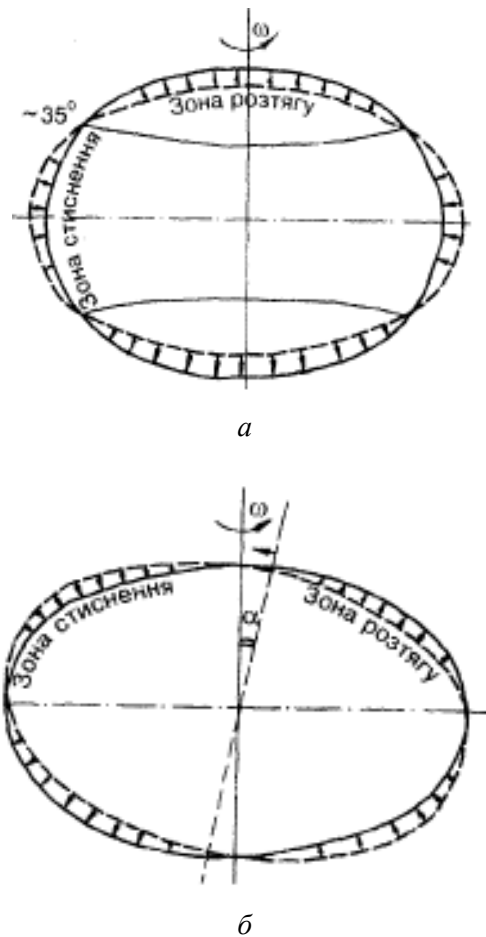


**Рис. 1.** Схематична ілюстрація формування фігури Землі:

а – в початковий період, коли Земля була ближче до гідростатичного стану;

б – сучасний стан фігури і поверхні літосфери Землі

**Fig. 1.** Schematic illustration of the Earth shape formation the: a – in the initial period when the Earth was in the state of near hydrostatic equilibrium; b – the current state of Earth's shape and Earth's lithosphere surface



**Рис. 2.** Схематичний розподіл напруг у літосфері Землі:

а – в результаті зміни обертового руху навколо осі; б – в результаті зміни положення осі обертання

**Fig. 2.** Schematic stress distribution within the Earth lithosphere: a – due to changes in rotational movement around the axis; b – due to position changing of the rotational axis

Деяким підтвердженням такого трактування трансформації фігури Землі можна розглядати припущення геологів А. Малуфа і Г. Халверсона [Malooof, Halverson, 2006] про те, що 800 мільйонів років тому сталося зміщення географічних полюсів Землі. Вивчаючи намагнічені мінерали в старих осадових породах норвезького архіпелагу, вони виявили, що північний магнітний полюс тоді змістився відразу на 50 градусів за якісь 20 мільйонів років. А оскільки тектонічні плити рухаються набагато повільніше, то це переміщення поверхні літосфери відносно ядра, де формується магнітне поле, автори роботи пояснили перебалансуванням мас земної кулі, внаслідок чого, можливо, відбулась швидка зміна положення осі обертання. Такий процес, імовірно, міг початися після виникнення деякого помітного дисбалансу мас у мантії. Наприклад, через появу

супервулкану недалеко від екватора. Так, дослідження А. Церклевича і О. Заяця [Церклевич А., Заяць О., 2012] дають підстави стверджувати, що під час геологічної еволюції Землі і Марса виникали тектонічні структури планетарного масштабу, які суттєво могли вплинути на ротаційні параметри і фігуру. Зокрема, для Землі реліктове підняття Дарвіна [Менард Г., 1966] могло змістити полюс до 15 км, а швидкість обертання сповільнити на 0,09 с. Для Марса вулканічне підняття Тарсіс [Мещеряков Г., Церклевич А., 1987] відповідно змінило положення полюса на 6 км і швидкість обертання на 0,06 с. Отримані результати, безумовно, є наближено оцінюваними і їх можна інтерпретувати як можливий варіант розвитку динамічних процесів на планетах, які можуть приводити до зміни положення осі обертання і, як наслідок, до виникнення напруженого стану і розломних структур.

Отож можна припустити, що вертикальні (радіальні) сили порушують осьову симетрію Землі, а горизонтальні сили (за рахунок енергії обертання), що виникають при цьому, відновлюють цю симетрію відповідним переміщенням окремих плит і блоків, а також “квазірідкої” внутрішньої речовини. Цілком можливо, що в тих самих горизонтальних рухах могли брати участь усі літосферні плити і їх переміщення повинне підкорятися загальному призначенню горизонтальних переміщень – відновленню осьової симетрії і збереження моменту кількості обертання.

**Мета**

Мета цієї роботи – показати як упродовж еволюційного саморозвитку планети в результаті дії гравітаційно-ротаційних сил відбувається перерозподіл мас, що приводить до напруженого стану тектоносфери і як наслідок – до трансформації фігури її поверхні. Вирішуючи обернену задачу за параметрами еволюційних змін фігури поверхні літосфери, можна визначати діючі сили, які зумовлюють динаміку напруженого стану Землі.

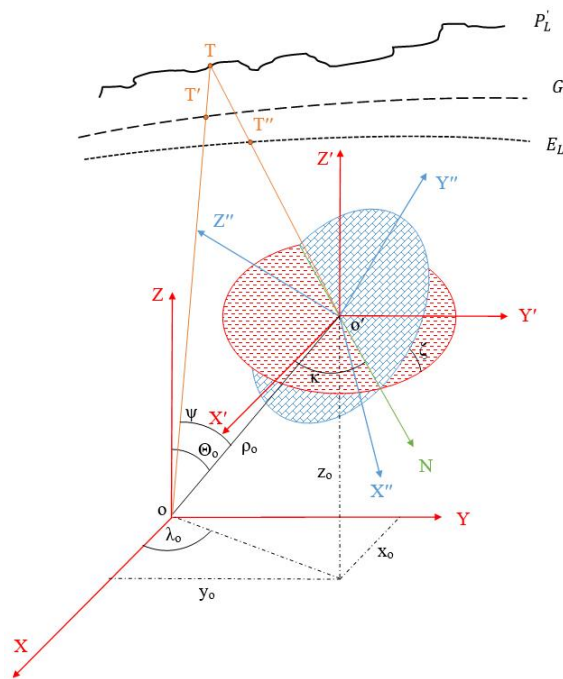
Для дослідження динаміки зміни фігури Землі використана ідея апроксимації поверхні літосфери двовісним еліпсоїдом з визначенням семи його параметрів, а за даними палеорекострукцій материків і водної поверхні появляється можливість відстеження вікових закономірностей трансформації фігури Землі. Зокрема, важливими є проведення дослідження щодо еволюції фігури Землі, які надають можливість інтерпретувати динаміку зміни фігури поверхні літосфери з позицій динамічних процесів, що впливають на напружений стан тектоносфери Землі.

**Методика**

Відповідно до постановки задачі насамперед необхідно визначити розміри й орієнтування такого еліпсоїда, який найближче підходив би до

фізичної поверхні планети. Вирішення цієї задачі розглянуто на прикладі апроксимації висот поверхні літосфери Землі двовісним еліпсоїдом у статті [Церклевич А., 2016]. Оскільки в подальшому нам будуть необхідні деякі позначення, то наведемо рисунок, який ілюструє апроксимацію поверхні літосфери двовісним еліпсоїдом.

Отож, розглянемо рис. 3, де зображені:  $P'_L$  – фізична поверхня Землі;  $G$  – геоїд;  $E_L$  – еліпсоїд, параметри якого необхідно визначити;  $o$  – центр мас Землі;  $o'$  – центр шуканого еліпсоїда;  $oZ$  – напрям осі обертання Землі;  $o'Z'$  – лінія паралельна осі  $oZ$ ;  $o'Z''$  – напрямок малої осі еліпсоїда  $E_L$ ;  $k, V$  – два з трьох кутів Ейлера;  $N$  – напрямок лінії вузлів;  $q_0, l_0, r_0$  – кути та відстань, що визначають зміщення центру шуканого еліпсоїда від центру мас;  $x_0, y_0, z_0$  – лінійні величини, що визначають зміщення шуканого еліпсоїда;  $T$  – точка на фізичній поверхні Землі;  $oT' = r'$ ;  $o'o = r_0$ ;  $oT = r$ ;  $TT'' = h$ ;  $o'T'' = r$ ;  $H$  – висота точки  $T$  над рівнем моря.



**Рис. 3.** Ілюстрація до апроксимації поверхні літосфери двовісним еліпсоїдом  
**Fig. 3.** Illustration to the approximation of lithosphere surface by biaxial ellipsoid

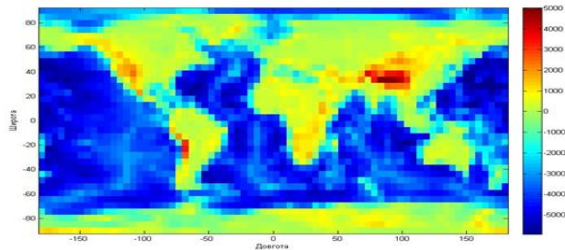
Прийнявши за геоїд загальноземний еліпсоїд, розмір і орієнтування еліпсоїда  $E_L$  визначимо за умовою  $\sum h^2 \rightarrow \min$ . Ця умова передбачає, що сума квадратів віддалей між визначуваним еліпсоїдом і поверхнею літосфери є мінімальною.

У табл. 1 наведено значення параметрів двовісного еліпсоїда. Обчислення семи параметрів

еліпсоїда виконувалось на основі даних цифрової моделі поверхні Землі ETOPO1 [NGIA 2016]. Для вказаної моделі висоти були осереднені в межах трапецій  $5^\circ \times 5^\circ$ . У результаті чого отримано 2592 значень висот поверхні літосфери  $h$  (див. рис. 4).

Таблиця 1  
**Параметри двовісного еліпсоїда**  
 Table 1  
**The parameters of two-axial ellipsoid**

Параметри	Вся планета	Північна півкуля	Південна півкуля
$x_0, м$	-741,89	-1170,64	-38,99
$y_0, м$	-491,57	-388,46	1,70
$z_0, м$	1421,79	1868,02	7287,17
$a_{xy}, м$	6375117,01	6375114,92	6376300,87
$a_z, м$	6355640,09	6355772,53	6362552,67
$l/\alpha$	327,31650	329,59304	463,79175
$\kappa$	133°,774	159°,308	110°,029
$\zeta$	2°,612	2°,610	2°,774



**Рис. 4.** Усереднена модель висот фізичної поверхні Землі ETOPO1.

Висоти подані в метрах  
**Fig. 4.** The averaged elevation model of the Earth's physical surface ETOPO1 in meters

Звернемо увагу на те, що полюси отриманих еліпсоїдів не збігаються з полюсом Землі, тобто екваторіальна площина фігури фізичної поверхні нахилена до екваторіальної площини геоїда і відповідний кут нахилу становить  $2^\circ,6$  або 289 км по дузі меридіана. Структурна асиметрія північної і південної півкуль також явно відстежується (колонки 3 і 4 табл. 1), а це означає, що існує видовження широтних кіл південної півкулі і укорочення довжин широтних кіл північної півкулі, тобто наявність розширення південної півкулі і, відповідно, стиснення північної півкулі відносно центру фігури Землі. Зміщення центру мас відносно центру фігури також характерне для Землі. Усе це вказує на грушеподібну фігуру планети, яка під впливом повільних вимушених відносних зміщень ядра і мантії може перебувати в динамічно змінному стані.

Отже, за результатами досліджень фігури поверхні літосфери виявилось, що ця фігура не гомотетично розміщена відносно фігури геоїда. Таке розміщення фігури літосфери і фігури геоїда може створювати напруження в тектоносфері

Землі, яке спрямоване на узгодження розподілу мас фігури геоїда.

Для розгляду цього питання обмежимося визначенням тільки тангенціальних (горизонтальних) сил, які виникають у зв'язку з цим перерозподілом мас у верхніх оболонках Землі (кора і верхня мантія). Введемо поняття "геоеволюційного" відхилення виска і припустимо, що тангенціальні сили пропорційні куту  $g$ , який визначається як кут між напрямком ліній виска в минулу геологічну епоху і нинішнім напрямком у заданій точці. Зауважимо, що еліпсоїд  $E_L$  у минулому наближено представляв рівневу поверхню нашої планети. Тепер йому відповідає еліпсоїд  $E'_L$ . Зрозуміло, що розміри еліпсоїда  $E'_L$  порівняно з  $E_L$  змінилися, оскільки змінилася зовнішня поверхня літосфери. Відповідно, параметри еліпсоїдів  $E'_L$  і  $E_L$  не є ідентичними. Однак, можемо припустити, що рівнева поверхня Землі в минулому приблизно збігалася з поверхнею  $E'_L$  і в разі такого припущення між напрямками ліній виска (нормаліями до еліпсоїдів) утворюється кут  $g$ .

Під час визначення кута  $g$  не враховуватимемо незбігання центрів еліпсоїдів  $E'_L$  і  $E_L$ , оскільки воно суттєво не вплине на результат.

Крім того, довготи відраховуватимемо не від Гринвіцького меридіана, а від лінії вузлів, тобто від лінії перетину площини екваторів еліпсоїдів  $E'_G$  і  $E_L$ .

Отже, в довільній точці на еліпсоїді  $E'_G$  маємо вираз для обчислення радіусу вектору:

$$r_0 = a_0(1 - a_0 \sin^2 j_0), \quad (1)$$

де  $\rho_0$  – радіус-вектор точки,  $\varphi_0$  – широта,  $\alpha_0$  – стиснення Землі.

Радіус-вектор  $r_0$  перетинає поверхню  $E'_L$  в деякій точці. Позначимо через  $\rho$  радіус-вектор цієї точки, і матимемо вираз для його обчислення:

$$r = a(1 - a \sin^2 j), \quad (2)$$

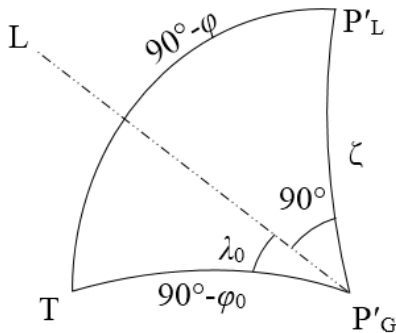
де  $r$  – радіус-вектор точки,  $j$  – широта, яка відраховується від площини екватора еліпсоїда  $E'_L$ ;  $a$  і  $a_0$  – відповідно велика піввісь і стиснення того ж еліпсоїда.

Відстані між еліпсоїдами  $E'_G$  і  $E'_L$  визначимо за формулою:

$$S = r - r_0 = a - a_0 + a_0 a_0 \sin^2 j_0 - a a \sin^2 j. \quad (3)$$

Звернемося до рис. 5, де прийняті такі позначення:  $P'_G$  і  $P'_L$  точки, що відображають на одиничній сфері положення полюсів еліпсоїдів  $E'_G$  і  $E'_L$ ;  $P'_G L$  – початковий меридіан, площина якого проходить через лінію вузлів;  $z$  – середня відстань між полюсами  $P'_G$  і  $P'_L$ ;  $T$  – точка, в якій визначаємо кут  $g$ .

Із сферичного трикутника виразимо  $j$  через  $j_0$  і  $I_0$ . Зауважимо, що  $I_0$  – довгота точки, яка відраховується від лінії вузлів.



**Рис. 5.** Ілюстрація до визначення кута  $g$   
**Fig. 5.** Illustration to the determination of angle  $g$

З рисунку маємо:

$$\sin j = \cos z \sin j_0 - \sin z \cos j_0 \sin I_0. \quad (4)$$

Тепер формулу (3) можемо записати так:

$$S = a - a_0 + (a_0 a_0 - a a \cos^2 z) \sin^2 j_0 - a a \sin^2 z \cos^2 j_0 \sin^2 I_0 + \frac{1}{2} a a \sin 2z \sin 2j_0 \sin I_0. \quad (5)$$

Введемо такі позначення для спрощення запису формули (5):

$$\begin{aligned} A &= a - a_0; \\ B &= a_0 a_0 - a a \cos^2 z; \\ C &= -a a \sin^2 z; \\ D &= \frac{1}{2} a a \sin 2z. \end{aligned} \quad (6)$$

У результаті отримаємо

$$S = A + B \sin^2 j_0 + C \cos^2 j_0 \sin^2 I_0 + D \sin 2j_0 \sin I_0. \quad (7)$$

Складові “геоеволюційного” відхилення виска в площині меридіана і в площині першого вертикалу відповідно матимуть вигляд:

$$x = \frac{1}{R} \frac{\partial S}{\partial j_0}, \quad h = \frac{1}{R \cos j_0} \frac{\partial S}{\partial I_0}, \quad (8)$$

де  $R$  – середній радіус Землі.

Взявши відповідні похідні з виразу (7), отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial j_0} &= 2B \sin j_0 \cos j_0 - 2C \sin j_0 \cos j_0 \sin^2 I_0 + \\ &+ 2D \cos 2j_0 \sin I_0; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial S}{\partial I_0} = 2C \cos^2 j_0 \sin I_0 \cos I_0 + D \sin 2j_0 \cos I_0. \quad (9)$$

Відповідно для складових відхилення виска матимемо:

$$x = \frac{2B}{R} \sin j_0 \cos j_0 - \frac{2C}{R} \sin j_0 \cos j_0 \sin^2 I_0 + \frac{2D}{R} \cos 2j_0 \sin I_0;$$

$$h = \frac{2C}{R} \cos^2 j_0 \sin I_0 \cos I_0 + \frac{D}{R} \sin 2j_0 \cos I_0. \quad (10)$$

Від складових “геоеволюційного” відхилення виска перейдемо до тангенціальних складових сил, які діють на одиницю маси у верхньому шарі Землі. Для цього помножимо вирази (10) на  $g$  – прискорення сили тяжіння.

Отже, отримаємо:

$$m = \frac{Bg}{R} \sin 2j_0 - \frac{Cg}{R} \sin 2j_0 \sin^2 I_0 + \frac{2Dg}{R} \cos 2j_0 \sin I_0; \quad (11)$$

$$n = \frac{Cg}{R} \cos^2 j_0 \sin 2I_0 + \frac{Dg}{R} \sin 2j_0 \cos I_0. \quad (12)$$

Так, за формулою (7) можемо розрахувати віддаль між еліпсоїдами  $E'_G$  і  $E'_L$ , тобто зниження чи підвищення літосфери відносно рівня моря внаслідок повороту жорсткої частини Землі, викликаної зміщенням літосфери як єдиної оболонки.

За формулами (11) і (12) визначаємо потенціальні сили, які виконують роль поступового повернення розподілу мас до стану рівноваги як механічної системи з обертанням навколо найменшого моменту інерції.

Зауважимо, що у формулі (7), окрім коефіцієнтів  $B, C, D$ , входить коефіцієнт  $A$ , який потребує корегування з урахуванням незмінності об'єму еліпсоїдів.

Отже, під час визначення  $A$  виходитимемо з того, що об'єм Землі за останні геологічні епохи суттєво не змінився. Ця умова приводить до рівності

$$a_0^2 b_0 = a^2 b. \quad (13)$$

Якщо прийняти

$$\left. \begin{aligned} a &= a_0 + \Delta a = a_0 \left( 1 + \frac{\Delta a}{a_0} \right), \\ b &= a_0 (1 - a_0) = a (1 - a) \end{aligned} \right\} \quad (14),$$

то отримаємо

$$1 - a_0 = (1 - a) \left( 1 + \frac{\Delta a}{a_0} \right). \quad (15)$$

З урахуванням малих величин, розклавши в ряд, одержимо

$$a_0 = a - 3 \left( \frac{\Delta a}{a_0} \right) \quad (16)$$

і відповідно з тією ж точністю маємо

$$a a = a_0 a = c, \quad (17)$$

де  $c$  – постійна, яка обчислюється під час заміни  $a a$  на відповідне значення.

$$a = \frac{c}{a_0}, \Delta a = \frac{a_0}{3}(a - a_0). \quad (18)$$

З урахуванням попередніх спрощень вираз (7) можна представити у вигляді

$$S = \frac{aa}{2} \sin I_0 \sin 2j_0 \sin 2z - aa \cos^2 z \sin^2 j_0 - aa \sin^2 z \sin^2 I_0 \cos^2 j_0 + a - a_0. \quad (19)$$

Цікавим є також визначення найбільшого підняття одного еліпсоїда над іншим, яке може проходити по кривій лінії (умовно цю лінію можна назвати “тектонічним водорозділом”). Уздовж цієї лінії може проходити розлом у літосфері чи поділ літосферних плит.

Максимальне значення висоти в площині заданого меридіана можна визначити з умови:

$$\frac{\partial S}{\partial j_0} = 0, \quad (20)$$

або

$$B \sin 2j_0 - C \sin 2j_0 \sin^2 I_0 + 2D \cos 2j_0 \sin I_0 = 0. \quad (21)$$

Максимальна ж висота еліпсоїда над геоїдом знаходиться в площині меридіана з довготою  $I_0 = 90^\circ$ , тобто матимемо:

$$(B - C) \sin 2j_0 + 2D \cos 2j_0 = 0. \quad (22)$$

Підставивши замість  $B, C, D$  їхні вирази, отримаємо:

$$a_0 a_0 - aa (\cos 2z - \sin 2z \operatorname{ctg} 2j_0) = 0. \quad (23)$$

Замінивши у виразі (23) величини на їх числові значення, отримаємо значення  $j_0$ . Довготу  $I_0$  відраховуємо від Гринвіцького меридіана, де й знаходиться розлом літосфери.

Щоб перейти від тангенціальних складових прискорення до сил, які викликані надлишковими масами на поверхні планети, скористаємося такими виразами:

$$\left. \begin{aligned} F_{j_0} &= mdSP \\ F_{I_0} &= ndSP \\ F_R &= gdSP \end{aligned} \right\}, \quad (24)$$

де  $P$  – площа відповідної трапеції, для центру якої обчислені  $m, n, S$ ;  $d$  – густина надлишкових мас.

Площу трапецій знайдемо за відомою формулою:

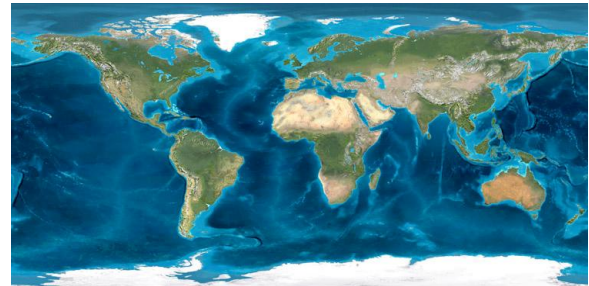
$$P = a^2 (1 - e^2) (I_2 - I_1) (\sin j_2 - \sin j_1) + \frac{2}{3} e^2 (\sin^3 j_2 - \sin^3 j_1) + \frac{3}{5} e^4 (\sin^5 j_2 - \sin^5 j_1) + \frac{4}{7} e^6 (\sin^7 j_2 - \sin^7 j_1), \quad (25)$$

де  $e$  – перший ексцентриситет;  $j_1, j_2, I_1, I_2$  – широти і довготи крайніх паралелей і меридіанів.

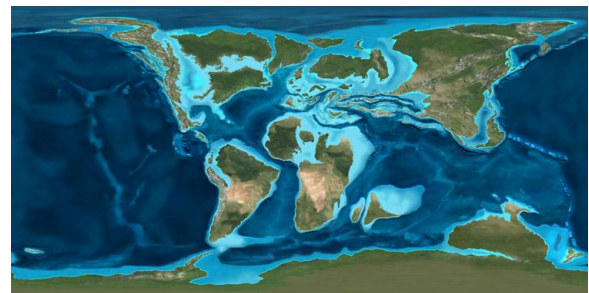
### Вибір вхідних даних

Для моделювання трансформації фігури Землі у далекі геологічні епохи використані растрові карти палеорекострукцій розміщення материків і водної поверхні (рис. 6), які створив професор Рон Блекі в університеті північної Аризони [Blakey R., 2016].

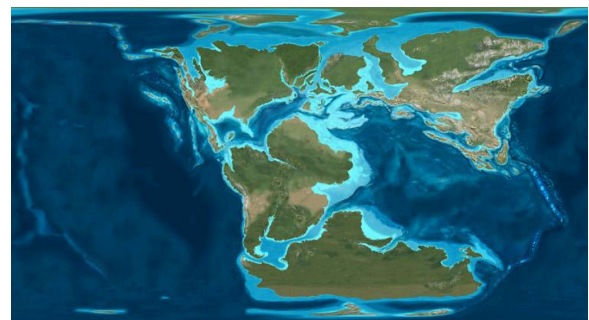
Перед нами постало питання: як зрозуміло, в межах обґрунтованої невизначеності, отримати цифрові моделі висот поверхні Землі за растровими зображеннями геологічних епох.



a



б



в

**Рис. 6.** Палеорекострукції розміщення материків: *a* – теперішній час; *б* – 90 мільйонів років назад; *в* – 150 мільйонів років назад [Blakey, 2016]  
**Fig. 6.** Paleoreconstructions of the continents locations: *a* – at now; *б* – 90 million years ago; *в* – 150 million years ago [Blakey, 2016]

Для сучасної геологічної епохи в наявності є растрове зображення (рис. 4) цифрової моделі поверхні ETOPO1. Для інших геологічних епох, окрім карт палеорекострукцій розміщення

материків і водної поверхні, у нас не має навіть наближених даних про висоти фізичної поверхні. Оскільки всі растрові зображення створені послідовно в певних кольорах, то з певним припущенням, знайшовши зв'язок між зображенням висот моделі ETOPO1 і растровими картами палеорекострукцій, можна буде перейти до цифрової моделі поверхні (ЦМП) для геологічних епох, які прив'язані до відповідних карт із зображенням материків і водної поверхні.

Якщо кожен піксель цього зображення розкласти на три кольорові складові (червоний, зелений і синій RGB) з певним рівнем яскравості, то на основі апроксимації заданої функції, що описується трьома змінними, можна отримати значення коефіцієнтів моделі. ЦМП ETOPO1 була осереднена до піксельної структури зображення, яке показано на рис. 4. Отже, наприклад, якщо розміри зображення в пікселях становлять 750×1500, то ЦМП відповідатиме аналогічним розмірам. Для кожного пікселя отримуємо відповідне значення висоти та три кольорові складові, відображених у характеристиках яскравості, які вигідно представляти у вигляді поліноміального рівняння:

$$F(h) = \left. \sum_{m=0}^n a_m R^i G^j B^k \right\}, \quad (26)$$

$$i + j + k \leq m$$

де  $h$  – значення висоти відповідного пікселя;  $R, G, B$  – три складові кольору відповідного пікселя;  $a$  – невідомі коефіцієнти.

Для описаного випадку найкраще підходить поліном третього ступеня. Отже, перше рівняння запишеться як:

$$F(h) = a_1 + a_2 \cdot R + a_3 \cdot G + a_4 \cdot B + a_5 \cdot R \cdot G + \mathbf{K} + a_{19} \cdot GB^3. \quad (27)$$

Невідомі коефіцієнти можна обчислити, використавши спосіб найменших квадратів. З правої частини рівняння (27) формується матриця коефіцієнтів з багатьма невідомими, а ліва – виступає у ролі вектора вільних членів. За вагову матрицю приймемо одиничну діагональну матрицю. За результатами моделювання визначено, що для цієї апроксимації піксельних кольорів найкраще використовувати лише перші 19 коефіцієнтів рівняння (27).

### Отримані результати та їхня інтерпретація

Згідно із запропонованим алгоритмом апроксимації двовісним еліпсоїдом висот фізичної поверхні Землі, були отримані результати, які характеризують сім його параметрів у сучасний період (табл. 1) і для різних минулих геологічних епох (табл. 2). Так, відзначені вище планетарні параметри фігури поверхні літосфери, приймаючи до уваги фігуру геоїда, під впливом гравітації та ротаційних сил, можуть перебувати в динамічно змінному стані.

Розглянемо тепер детальніше результати апроксимації двовісним еліпсоїдом поверхні літосфери за даними комп'ютерного моделювання висот розміщення материків і водної поверхні на растрових картах палеорекострукцій за геологічною шкалою, починаючи від сучасної епохи, до 600 млн р. опісля. Звернемо насамперед увагу на траєкторію місць розташування північного полюса двовісного еліпсоїда, наближеного до поверхні літосфери Землі в різні періоди геологічної історії, яка зображена на рис. 7.

Таблиця 2

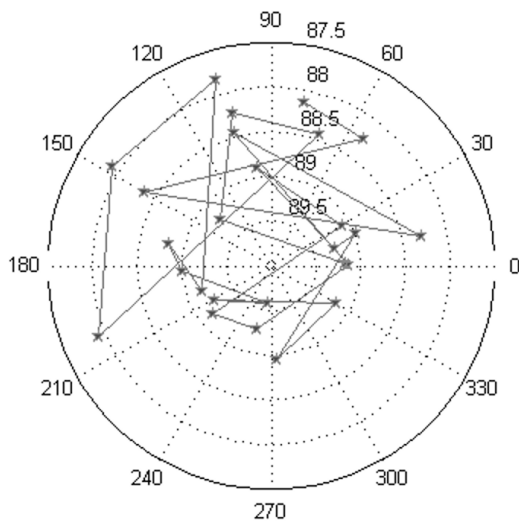
### Параметри двовісного еліпсоїда визначені за ЦМП палеорекострукцій розміщення материків і водної поверхні

Table 2

### Parameters of two-axial ellipsoid computed by the paleoreconstructional DEMs of continents and water surface location

Епоха	млн років	dx, м	dy, м	dz, м	a, м	b, м	1/f	κ, °	ζ, °
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Нині	0	-741,89	-491,57	1421,79	6375117,01	6355640,09	327,31650	133,774	2,612
Міоцен	20	-804,78	-513,25	1385,80	6375391,62	6355104,02	314,25061	136,964	1,745
Олігоцен	35	-891,11	-469,40	1374,51	6375221,46	6355171,91	317,97332	132,350	1,646
Еоцен	50	-1007,87	-553,61	1641,61	6375076,22	6355003,82	317,60396	123,648	1,715
Третинний	65	-1199,99	-708,06	1441,27	6375311,39	6354761,97	310,24300	125,296	1,551
Пізня крейда	90	-1529,11	-988,92	871,49	6375179,54	6355006,63	316,02682	123,462	0,857
Середня крейда	105	-1462,74	-1012,89	844,37	6375101,75	6354953,02	316,40218	222,188	0,715
Рання крейда	120	-1476,94	-1166,12	802,78	6375248,34	6354959,36	314,22214	202,670	0,848

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Пізня юри	150	-1656,77	-1039,32	977,50	6375268,85	6354697,77	309,91425	243,344	0,905
Середня юри	170	-1664,75	-1046,02	1051,33	6375408,23	6354669,95	307,42228	244,548	1,107
Рання юри	200	-1860,17	-945,67	1095,19	6375448,88	6354619,43	306,07857	92,301	-0,731
Пізній тріас	220	-2048,23	-1054,53	739,69	6375451,50	6354538,66	304,85820	262,054	1,008
Середній тріас	250	-1897,84	-1268,50	856,25	6375318,56	6354391,96	304,65134	241,322	1,050
Пізній перм	260	-1779,82	-1214,28	1313,30	6375377,07	6354603,55	306,89926	254,863	0,835
Ранній перм	280	-1669,15	-1017,50	1391,74	6375209,78	6354564,66	308,79985	233,940	0,743
Пенсильваній	300	-1234,57	-814,51	1535,35	6374820,93	6354713,09	317,03174	165,771	0,416
Міссісіпій	340	-945,11	-501,59	1879,01	6374985,12	6354267,14	307,70294	202,046	-1,002
Середній девон	370	-858,88	-826,78	1577,58	6375165,57	6353723,94	297,32654	182,932	-1,180
Ранній девон	400	-442,66	-353,69	1563,66	6374892,13	6353973,03	304,74035	227,475	-0,828
Силур	430	-7,09	-0,19	1101,32	6375191,65	6353448,54	293,20524	112,748	2,074
Пізній ордовік	450	120,12	-187,12	1133,43	6375224,42	6353475,72	293,13132	113,466	2,096
Середній ордовік	470	190,96	150,16	1499,07	6375165,52	6353598,70	295,60070	139,549	2,081
Пізній кембрій	500	411,01	519,43	1444,83	6375283,82	6353292,73	289,90292	193,785	1,574
Ранній кембрій	540	574,78	363,00	1803,15	6375041,61	6353795,10	300,05120	188,101	1,768
Останній докембрій	560	209,14	40,95	1511,69	6374602,59	6353841,12	307,04002	182,397	0,777
Пізній докембрій	600	375,06	-106,34	1907,11	6374427,51	6354638,59	322,12119	205,170	-0,824



**Рис. 7.** Траєкторія місця розташування північного полюса двовісного еліпсоїда, наближеного до поверхні літосфери Землі в різні періоди протягом 600 млн р.

**Fig. 7.** North pole location trajectory of two-axle ellipsoid (approximating the surface of the Earth's lithosphere) at different periods during last 600 million years

Максимальне відхилення полюса малої півосі серед отриманих еліпсоїдів від північного полюса Землі не перевищує  $2^{\circ},6$  (мабуть, значення близьке до критичного), що підтверджує висловлене раніше припущення про переміщення літосферних плит, яке підпорядковується геодинамічному процесу, спрямованому на відновлення осової симетрії та збереженню моменту кількості обертання. З отриманих розрахунків також слідує, що середній радіус Землі збільшився за 600 млн р. майже на 1 км, а об'єм Землі за цей період геологічного часу побільшав на 0,04 %. Відповідні графіки зміни середнього радіуса Землі, а також радіуса північної та південної півкулі, протягом 600 млн р. показані на рис. 8, а швидкості цих змін подані в табл. 3.

Отже, отримані результати можуть давати підставу для припущення щодо розширення Землі. Ця гіпотеза охоплює все ширше коло прихильників серед науковців, які вивчають еволюцію Землі, і має цілком вагоме обґрунтування (див. [Блінов В., 2011] і наведену там літературу). Так, наприклад, Н. Павленкова [Павленкова Н., 2016] приводить такі докази щодо розширення Землі:

– утворення Тихого океану, який оконтурений кільцем зон високої сейсмічності, що має правильну форму і майже під прямим кутом



пересікається Альпійсько-Гімалайським кільцем. Така форма глобальних структур свідчить про їх утворення в результаті загальної еволюції планети, наприклад, внаслідок її розширення;



**Рис. 8.** Зміна середнього радіуса Землі на протязі 600 млн р.

**Fig. 8.** The changes of average Earth's radius over the period of 600 million years

Таблиця 3

**Швидкості вікового збільшення середнього радіуса Землі**

Table 3

**Secular variations in Earth's mean radius**

Область	Від 600 млн р. тому до нашого часу, мм/рік
Ціла планета	+0,001
Північна півкуля	+0,003
Південна півкуля	+0,002

– геометричну форму серединно-океанічних хребтів, яка відстежується через всю планету у вигляді зон підвищеної водневої дегазації, також можна інтерпретувати з позицій розширення Землі з інтенсивнішим розширенням південної півкулі, про що свідчить грушвидна форма планети;

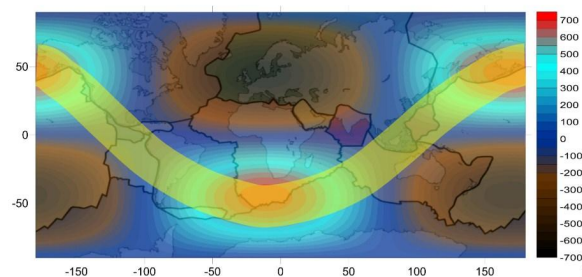
– модель розширення Землі дає змогу пояснити переміщення літосферних плит із збереженням їхніх глибоких коренів, наявність в океанах блоків континентальної кори і давній вік океанічної кори;

– дегазація Землі є головним джерелом енергії глобальних тектонічних процесів і може спричиняти розщільнення мантіїної речовини з відповідним збільшенням об'єму та одночасною концентрацією важких елементів у ядрі. Можливе збільшення об'єму мантіїної речовини підтверджується лабораторними дослідженнями.

Так, наведені аргументи можуть слугувати науковим підґрунтям для пояснення цілком можливого збільшення радіуса Землі, яке відстежується за результатами моделювання поверхні літосфери і її апроксимації двовісним еліпсоїдом за період 600 млн р. і в сучасну епоху [Церклевич А., 2017].

Розглянемо тепер як варіації ротаційного режиму фігури поверхні літосфери можуть впливати на напружений стан тектоносфери, а відтак спонукати тектонічну активізацію Землі.

На рис. 9 подано карту з нанесеними ізолініями висот між еліпсоїдами, які описують поверхню літосфери і геоїда. На цій карті дугоподібною полоскою відображено названий нами “тектонічний водорозділ”, який характеризує найвище підняття еліпсоїда, наближеного до поверхні літосфери, відносно поверхні загальноземного еліпсоїда, що описує геоїд. Він, як виявилось, проходить уздовж границь тектонічних плит, за винятком Південно-Американської плити, що наводить на думку про визначальну роль у їх формуванні гравітаційно-ротаційних сил.



**Рис. 9.** Карта відстаней між еліпсоїдами.

Висоти подані в м. Крива смуга на рисунку відповідає “тектонічному водорозділу”

**Fig. 9.** Map of distances between ellipsoids.

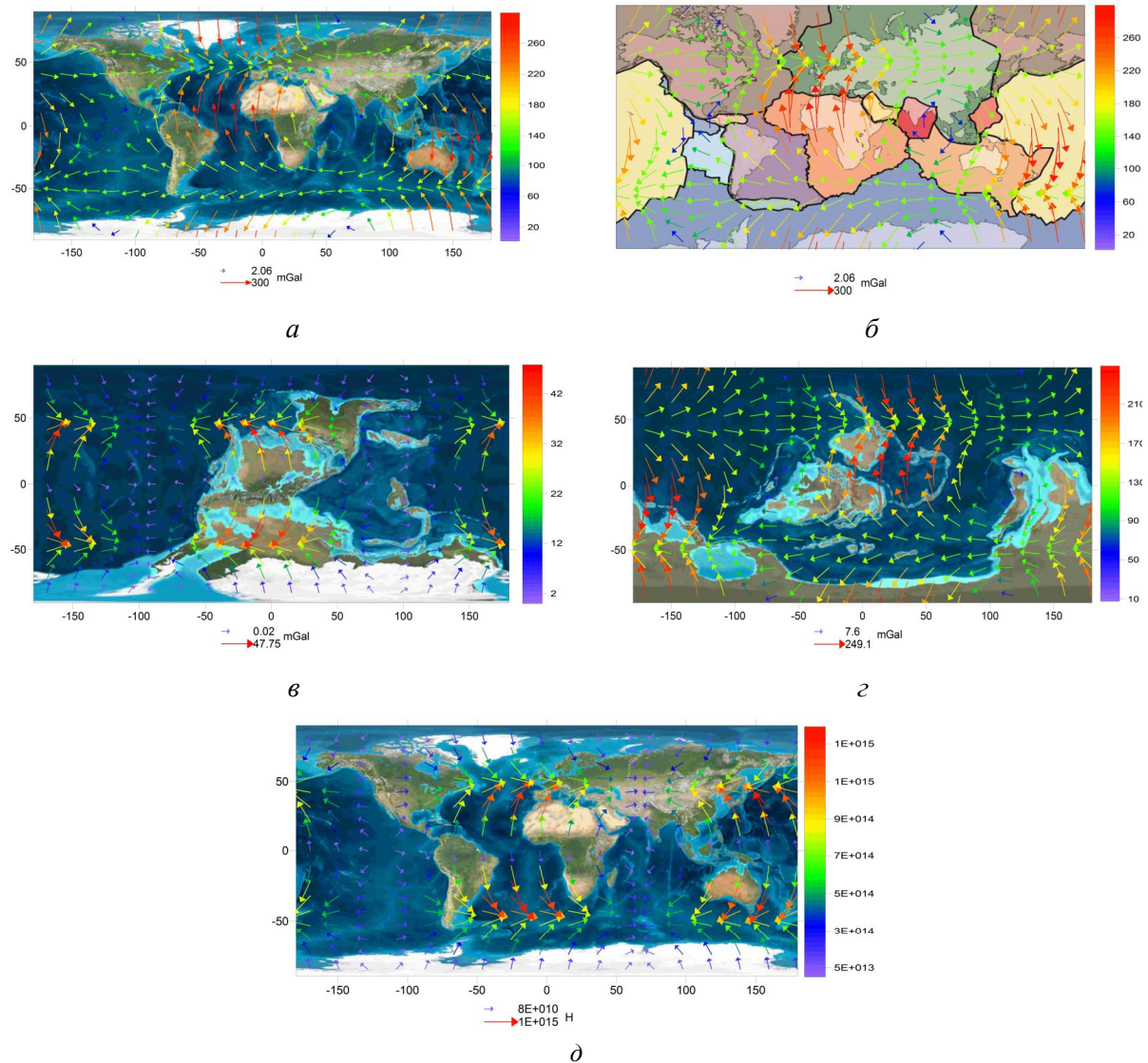
Heights are given in meters. Curve line in figure corresponds to the “tectonic watershed”

Щодо розподілу поля векторів тангенціальних сил та поверхневого навантаження на 10<sup>0</sup> трапецію (рис. 10), то необхідно відзначити в першу чергу їх узгодженість з контурами материків, тобто стрілки векторів чітко вказують на напрямки руху тектонічних плит і переміщення материків та формування океанічної поверхні упродовж еволюції Землі.

Безумовно, отримані результати, зображені на рис. 9 і 10, потребують детальнішої інтерпретації з позицій тектоніки плит і автори мають наміри подати її в наступній статті.

**Наукова новизна**

Розглянута планетарна динаміка вікових змін форми Землі за результатами апроксимації висот поверхні літосфери двовісним еліпсоїдом на основі цифрової моделі поверхні Землі ETOPO1 [NGIA 2016] і моделей палеорекострукцій материків і водної поверхні. Виявлені трендові закономірності вікових змін параметрів фігури Землі. Введено поняття “геоеволюційного” відхилення виска, на основі якого розраховані тангенціальні сили, що діють у верхній оболонці планети. Розглянуто інтерпретацію ролі гравітаційно-ротаційних сил у формуванні глобального поля напружень у тектоносфері Землі.



**Рис. 10.** Карти тангенціальних сил на фоні материків і океанів та тектонічних плит. Стрілками показані тангенціальні сили в мілігалах, тангенціальні напруження в паскалях. *a, б і г* – для сучасної епохи; *в* – 300 млн р. тому; *г* – 450 млн р. тому, які відповідають значенням  $\zeta = 0^\circ,416$ ,  $\zeta = 2^\circ,096$  відхилення полюса

**Fig. 10.** Distribution of tangential forces on the background of continents, oceans and tectonic plates. The arrow shows surface tangential stress (Pa) and the tangential forces (mGal) which correspond to the maximum and minimum deviation of Pole. *a, б and г* – for the modern era; *в* – 300 million years ago  $\zeta = 0^\circ,416$ ; *г* – 450 million years ago  $\zeta = 2^\circ,096$

**Практична значущість**

Подані результати можна використовувати у подальших дослідженнях, які спрямовані на вивчення планетарних характеристик нашої планети, динаміки їхніх змін у часі та глобального напруженого стану.

**Висновки**

Збільшення середнього радіуса Землі підтверджується за результатами комп'ютерного моделювання палеорекострукцій розміщення материків і водної поверхні на растрових картах палеорекострукцій за геологічною шкалою, починаючи від сучасної епохи до 600 млн р. тому. Інтерпретація

проведених досліджень показала, що сценарій розширення Землі упродовж її еволюції цілком можливий. Цікавими виявилися також проекції малої осі двовісного еліпсоїда на поверхню літосфери в різні геологічні епохи. Так, максимальне відхилення полюса малої півосі від північного полюса Землі не перевищує  $2^{0,6}$  для 26 отриманих еліпсоїдів, які апроксимують поверхню літосфери для різноманітних геологічних епох, що може вказувати на критичну величину відхилення географічного полюса від осі обертання Землі для будь-якої конфігурації розміщення материків і водної поверхні.

Розглянуті поля тангенціальних сил, а також поверхневе навантаження показують хорошу

узгодженість з формою материків і розміщенням тектонічних плит. Феноменальна картина проходження на сфері Землі названого нами “тектонічного водорозділу”, яка майже повністю збігається з положенням міжплитових границь вказує на те, що це зовсім не випадковість. Безумовно, можна підібрати іншу систему сил, які, можливо, пояснювали б таку закономірність для окремих тектонічних плит чи розміщення материків у цьому місці. Однак важко було навіть уявити, що існує досить проста система горизонтальних сил, яка так чудово описує конфігурацію материків у динаміці їхнього геологічного розвитку. Це досить переконливо свідчить про те, що поверхневі маси під дією гравітаційно-ротаційних сил набувають властивості повзучості за довготривалої їхньої дії.

Пізніше автори передбачають виконати дослідження з порівнянням векторів переміщення окремих плит на основі експериментальних даних ГНСС-спостережень за постійно діючими перманентними станціями. Водночас ми усвідомлюємо, що таке порівняння не зовсім коректне, оскільки тривалість ГНСС-спостережень не співрозмірна з геологічним часом.

### Література

- Блинов В. Ф. Растущая Земля: из планет в звезды / В. Ф. Блинов // Электронная монография. – Киев, 2011. – 305 с.
- Менард Г. У. Геология дна Тихого океана / Г. У. Менард. – М. : Мир, 1966. – 275 с.
- Павленкова Н. И. Нерешенные проблемы глобальной тектоники и возможные пути их решения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=deVM7FB29FE>
- Тяпкин К. Ф. Изучение разломных структур геолого-геофизическими методами / К. Ф. Тяпкин, К. Ф. Кивелюк. – М. : Недра, 1982. – 239 с.
- Церклевич А. Л. Геодинамічна еволюція фігури Землі та Марса / А. Л. Церклевич, О. С. Заяць // Геодинаміка. – 2012. – № 2(13). – С. 38–42.
- Церклевич А. Л. Апроксимація висот фізичної поверхні Землі двовісним і тривісним еліпсоїдами / А. Л. Церклевич, О. С. Заяць, Є. О. Шило // Геодинаміка. – 2016, № 1(20). – С. 40–49.
- Церклевич А. Л. Динаміка трансформації фігури Землі / А. Л. Церклевич, О. С. Заяць, Є. О. Шило // Кинематика і фізика небесних тел. – 2017. – Т. 33. – № 3. – С. 54–69.
- Blakey R. Global Paleogeography [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www2.nau.edu/rcb7/globaltext2.html>
- Maloof A. C. Combined paleomagnetic, isotopic, and stratigraphic evidence for true polar wander from the Neoproterozoic Akademikerbreen Group, Svalbard, Norway / A. C. Maloof, G. P. Halverson, J. L. Kirschvink et al. // Geological Society of America Bulletin. – 2006. – Vol. 118, no. 9/10. – P. 1099–1124.
- National Centers for Environmental Information, ETOPO1 Global Relief Model [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>

А. ЦЕРКЛЕВИЧ, А. ЗАЯЦЬ, Е. ШИЛО

Национальный университет “Львовская политехника”, ул. С. Бандеры, 12, Львов, Украина, 79013, тел. (099)-95-41-434, ел. почта [shyloyevhenii@gmail.com](mailto:shyloyevhenii@gmail.com)

### О НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ ТЕКТОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

**Цель.** В науках о Земле большое значение приобретают планетарные задачи, связанные с изучением напряженного состояния тектоносферы Земли. Цель данной работы – показать, как в процессе эволюционного саморазвития планеты в результате действия гравитационно-ротационных сил происходит перераспределение масс, что приводит к напряженному состоянию тектоносферы и как следствие – к трансформации фигуры ее поверхности. Решая обратную задачу по параметрам эволюционных изменений фигуры поверхности литосферы, можно определять действующие силы, которые обуславливают динамику напряженного состояния Земли. **Методика.** Из предыдущих исследований авторов оказалось, что фигура поверхности литосферы имеет иную ориентацию относительно фигуры геоида. Такое размещение фигуры литосферы и фигуры геоида может создавать напряжение, которое направлено на приведение распределения масс в соответствии с фигурой геоида. Решение этой задачи рассматривается на примере аппроксимации высот поверхности литосферы двухосным эллипсоидом. Описанный алгоритм применяется для аппроксимации ЦМР ETOPO1. Высоты моделей усредняются в пределах трапеций  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  и на основе этих данных находят параметры двухосного эллипсоида. Введя понятие “геоэволюционного” отклонения отвеса и предположив, что тангенциальные силы пропорциональны углу, который определяется как угол между направлением линий отвеса в минувшую геологическую эпоху и нынешним направлением в заданной точке, можно рассчитать действующие силы в верхней оболочке планеты. **Результаты.** Предложен оригинальный алгоритм определения тангенциальных сил и дана их интерпретация с позиций исследования планетарной динамики фигуры Земли и глобального напряженного состояния. **Научная новизна.** Введено понятие “геоэволюционного” отклонения отвеса, на основе которого рассчитаны тангенциальные силы, действующие в верхней оболочке планеты. Данная интерпретация роли гравитационно-ротационных сил в формировании

глобального поля напружених в тектоносфері Землі. **Практическая значимость.** Представленные результаты будут использоваться в дальнейших исследованиях, направленных на изучение планетарных характеристик нашей планеты, динамики их изменений во времени и глобального напряженного состояния.

*Ключевые слова:* напряженное состояние тектоносферы, поверхность литосферы Земли, двухосный эллипсоид, “геоэволюционное” отклонения отвеса, тангенциальные силы.

A. TSERKLEVYCH, O. ZAYATS, Y. SHYLO

Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, Ukraine, 79013 tel. (099)-98-41-434, e-mail: shyloyevhenii@gmail.com

#### ON THE STRAINED STATE TECTONOSPHERE EARTH

**Purpose.** Planetary problems related to the study of the stress state of Earth tectonosphere became of wide importance in geosciences. The purpose of this paper is show how gravitational-rotational forces cause density redistribution resulting in stress state of tectonosphere and consequently Earth shape and surface transformation during Earth self-evolutionary process. Also it is possible to determine acting forces, that cause the dynamic of the Earth stress state by solving the inverse problem using parameters of evolutionary changes of the lithosphere shape and surface. **Methods.** Previous studies reveal that the figure of the Earth lithosphere surface is slightly rotated relatively to the geoid figure. Such mutual arrangement of lithosphere surface and geoid result in stress aimed to the density redistribution within the Earth for being in accordance with geoid surface. The solution to this problem is considered based on approximation of the Earth lithosphere by two-axial ellipsoid. Such approach was used for approximation of DTM ETOPO1. For estimating of ellipsoid parameters (smilaxes, shifts, rotations) topographical heights of ETOPO1 model were averaged in the  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  trapezoids. Introducing the notion of “geoevolutionary” a plumb line deviation and assuming that tangential stress forces are proportional to the angle  $g$  in between directions of plumb lines in the past geological era and nowadays direction at the set point it is possible to estimate acting stress forces in the upper shell of planet. **Results.** Algorithm for estimation of tangential forces and its interpretations from the point of view of Earth shape planetary dynamics investigations and global stressed state are proposed. **The scientific novelty.** The concept of “geoevolutionary” plumb line deviation is introduced and is used for computations of tangential forces acting on the top shell of the planet. Interpretation of the role of gravitational and rotation forces in formation of the global stress field in the Earth tectonosphere is given. **The practical significance.** The results are going to be used in further investigations aimed to the study of planetary characteristics its dynamical variations and global stress state of our planet.

*Key words.* Stressed state of tectonosphere, surface of Earth lithosphere, two-axial ellipsoid, “geoevolutionary” plumb line deviation, tangential forces.

#### REFERENCES

- Blinov V. F. *Rastushhaja Zemlja: iz planet v zvezdy* [The growing Earth: from planets to stars]. Kiev: 2011 [in Ukrainian].
- Menard G. U. *Geologija dna Tihogo okeana* [Geology of Pacific Ocean bottom]. Moscow: Mir 1966, in Russian.
- Pavlenkova N. I. *Nereshennye problemy global'noj tektoniki i vozmozhnye puti ih reshenija* [Unsolved problems of global tectonics and possible ways of its solution]. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=deVM7FB29FE>, 2016 [in Russian].
- Tiapkin K. F. *Izuchenie razlomnyh struktur geologo-geofizicheskimi metodami* [The study of fractured structures by the geological and geophysical methods] Moscow: Nedra, 1982 [in Russian].
- Tserklevych A. L. & Zaiats' O.S. *Heodynamichna evoliutsiia fihury Zemli ta Marsa* [Geodynamical evolution of the Earth's and Mars's shapes]. *Geodynamics*, no. 2(13), pp. 38–42 [in Ukrainian].
- Tserklevych A. L., Zaiats' O. S. & Shylo Y. O. *Aproksymatsiia vysot fizychnoi poverkhni Zemli dvovisnym i tryvisnym elipsoidamy* [Approximation of the physical surface of the Earth by biaxial and triaxial ellipsoid] *Geodynamics*, 2016, no. 1(20), pp. 40–49 [in Ukrainian].
- Tserklevych A. L., Zaiats' O. S. & Shylo Y. O. *Dynamika transformatsiyi fihury Zemli* [Dynamic of the Earth shape transformation] *Kynematyka y fizyka nebesnykh* [Kinematics and physics of celestial bodies], 2017, vol. 33. no., pp. 54–69 [in Ukrainian].
- Blakey R. Global Paleogeography Retrieved from <https://www2.nau.edu/rcb7/globaltext2.html>, 2016 [in USA].
- Malooof A. C., G. P. Halverson, J. L. Kirschvink, D. P. Schrad, B. P. Weiss & P. F. Hoffman (2006) Combined paleomagnetic, isotopic, and stratigraphic evidence for true polar wander from the Neoproterozoic Akademikerbreen Group, Svalbard, Norway, *Geological Society of America Bulletin*, vol. 118, no. 9/10, pp. 1099–1124 [in USA].
- National Centers for Environmental Information (2015) ETOPO1 Global Relief Model Retrieved from <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html> [in USA].

Надійшла 05.10.2016 р.