

УДК 528.2+551

А. Л. Церклевич, О. С. Заяць, Є. О. Шило

Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери 12, Львів, 79013
anatoltser@gmail.com

Динаміка трансформації фігури Землі

Вивчається планетарна динаміка вікових змін форми Землі на основі апроксимації висот поверхні літосфери двовісним еліпсоїдом. За даними ГНСС-вимірювань на перманентних станціях у північній і південній півкулях в сучасну епоху, а також на основі моделей палеорекострукцій материків і водної поверхні виявлені трендові закономірності вікових змін параметрів фігури Землі.

ДИНАМИКА ТРАНСФОРМАЦИИ ФИГУРЫ ЗЕМЛИ, Церклевич А. Л., Заяць О. С., Шило Е. О. — Изучается планетарная динамика вековых изменений формы Земли на основе аппроксимации высот поверхности литосферы двухосным эллипсоидом. По данным ГНСС-измерений на перманентных станциях в северном и южном полушариях в современную эпоху, а также на основе моделей палеорекострукций материков и водной поверхности выявлены трендовые закономерности вековых изменений параметров фигуры Земли.

DYNAMIC OF THE EARTH SHAPE TRANSFORMATION, by Tserklevych A. L., Zayats O. S., Shylo Ye. O. — Planetary dynamics of secular Earth shape changes are studied based on the approximation of the physical Earth surface by biaxial ellipsoid. The secular changes of Earth-shape parameters were revealed from the analysis of following data: modern GNSS measurements on permanent stations in the Northern and Southern Hemispheres and paleoreconstructions model for continental and ocean surfaces.

ВСТУП

Земля — небесне тіло в Сонячній системі, і її фігура формується під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів космогенної, ендегенної і екзогенної природи. Зміни ротаційного режиму руху Землі як косміч-

ного тіла, а також ендегенні і екзогенні процеси призводять до трансформації фігури планети протягом геологічної історії. Розглядаючи структурну будову Землі, в якій виділяють декілька оболонок з різними реологічними властивостями: літосферу, астеносферу, мантію, зовнішнє і внутрішнє ядро, можна допустити, що гравітаційні та ротаційні сили здійснюють різний вплив на різні внутрішні оболонки. Наслідком такого впливу може бути циклічна геодинамічна нестійкість фігури Землі, яка проявляється у вікових варіаціях сили тяжіння, переміщенні центра мас планети, варіаціях коефіцієнтів геопотенціалу, вікових зміщеннях полюсів, зміні рівня світового океану, а також зміні швидкості обертання Землі. Безумовно, зовнішні і внутрішні фактори, такі як кліматичні зміни, сейсмічна та вулканічна активність і багато інших природних процесів взаємопов'язані з трансформацією фігури Землі.

Отже, геодинамічну еволюцію фігури Землі можна розглядати як зовнішній прояв процесу перерозподілу її маси в силовому полі, що динамічно змінюється з набуттям мінімальної потенційної енергії. Ці маси перебувають під впливом груп сил, дія яких породжує процеси переходу від одного стану тимчасової рівноваги до іншого в різних часових і просторових масштабах у планетарному полі геодформації. загальне геодформаційне поле формується 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 тріщинуватості регіонального масштабу, утворення лініаментних структур та велетенських геологічних розломів.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Наукові концепції еволюції планет вказують, що у минулому Земля була ближчою до гідростатичного стану, ніж зараз. Внаслідок цього зовнішня поверхня літосфери збігалася з фігурою еліпсоїда, який найкращим чином описував геоїд. Відповідно в той далекий період часу напрямком лінії виска збігався з напрямком нормалі до еліпсоїда, який апроксимував зовнішню поверхню літосфери. Схему еволюційного формування фігури Землі показано на рис. 1, де 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; позначення PP , P_L , E_L , E_G на рис. 1, б стосуються фігури і поверхні літосфери Землі в сучасну епоху.

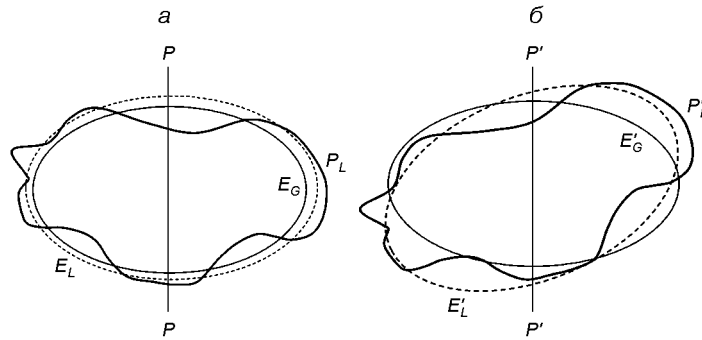


Рис. 1. Схема формування фігури Землі: *a* — в початковий період, коли Земля була ближче до гідростатичного стану, *б* — сучасний стан фігури і поверхні літосфери Землі

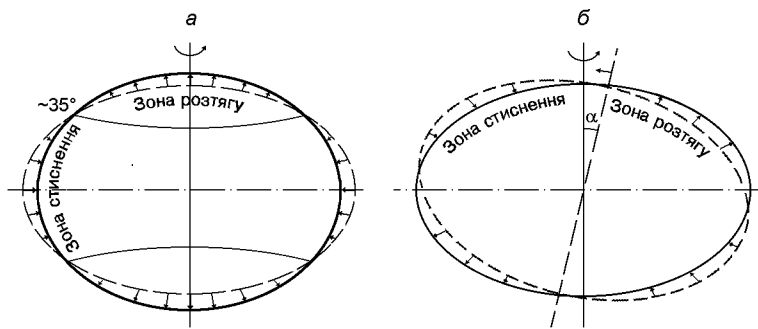


Рис. 2. Схематичний розподіл напруг в літосфері Землі: *a* — в результаті зміни обертового руху навколо осі, *б* — в результаті зміни положення осі обертання [5]

Таким чином, якщо зіставити два положення зовнішніх оболонок Землі на рис. 1, *a* і *б*, то можна допустити виникнення напруженого стану через зміну швидкості обертання і положення осі обертання відносно її фігури. Розподіл напруг в літосфері Землі, який може з'явитися в результаті трансформації фігури Землі, схематично показаний на рис. 2. Така схема розподілу напруг була запропонована К. Тяпкіним при описі нової ротаційної гіпотези структуроутворення [7]. У разі одночасної зміни параметрів ротаційного режиму Землі (кутової швидкості і положення осі обертання) передбачається, що сповільнення обертання Землі викликає появу напруг у літосфері, розподіл яких зображено на рис. 2, *a*, а зміна положення осі обертання призведе до переорієнтування фігури і утворення 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.

Деяким підтвердженням такого трактування трансформації фігури Землі може розглядатись висловлене геологами А. Малуфом і Г. Халверсоном [11] припущення про те, що 800 млн років тому назад 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

всього за 20 млн 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 розпочатися після виникнення великого дисбалансу мас у мантиї, наприклад через появу супервулкану недалеко від екватора. Так, проведені А. Церклевичем і О. Зайцем [9] дослідження дають підстави стверджувати, що у процесі геологічної еволюції Землі і Марса виникали тектонічні структури планетарного масштабу, які суттєво могли вплинути на ротаційні параметри і фігуру планети. Зокрема, для Землі гіпотетичне реліктове підняття Дарвіна [4] могло змістити полюс до 15 км, а період обертання сповільнити на 0.09 с. Для Марса вулканічне підняття Тарсіс [5] відповідно змінило положення полюса на 6 км і період обертання на 0.06 с. Отримані результати є оціночними, і їх можна інтерпретувати як можливий варіант розвитку динамічних процесів, які можуть викликати зміну положення осі обертання і, як наслідок, спричинити напружений стан і виникнення розломних структур в літосфері планет.

Отже, можна припустити, що вертикальні (радіальні) сили порушують осьову симетрію обертання Землі, а горизонтальні сили (за рахунок енергії обертання), що виникають при цьому, відновлюють цю симетрію шляхом відповідного переміщення окремих плит і блоків, а також «квазірідкої» внутрішньої речовини. Цілком можливо, що в цих же горизонтальних рухах могли брати участь всі літосферні плити, і їхнє переміщення повинне підкорятися загальному призначенню горизонтальних переміщень — відновленню осьової симетрії і збереженню моменту кількості обертання.

Для дослідження динаміки зміни фігури Землі ми використали ідею апроксимації висот поверхні літосфери двовісним еліпсоїдом, а за даними ГНСС-вимірювань на перманентних станціях у північній та південній півкулях зроблено спробу виявити трендову складову зміни фігури планети. Це перша задача, яка вирішувалась для оцінки змін фігури Землі в сучасну епоху, наступна — визначення параметрів двовісного еліпсоїда за даними висот палеорекострукцій розміщення материків і водної поверхні у різні геологічні періоди за матеріалами комп'ютерного моделювання, і на їхній основі — відстеження вікових закономірностей трансформації фігури Землі.

АПРОКСИМАЦІЯ ВИСОТ ПОВЕРХНІ ЛІТОСФЕРИ ДВОВІСНИМ ЕЛІПСОЇДОМ

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

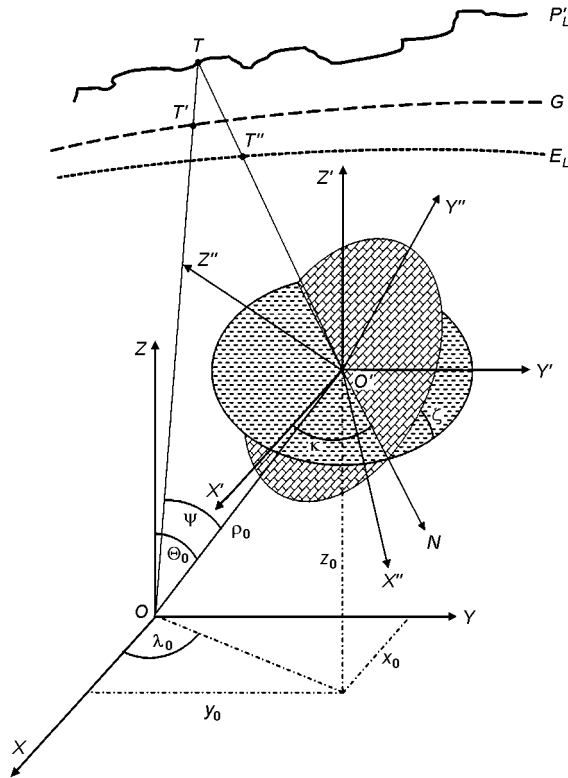


Рис. 3. Ілюстрація до апроксимації поверхні літосфери двовісним еліпсоїдом

обертання Землі, OZ — лінія, паралельна осі OZ , OZ — напрямок малої осі еліпсоїда E_L , $\psi, \theta_0, \lambda_0$ — два з трьох кутів Ейлера, N — напрям лінії вузлів, $\rho_0, \theta_0, \lambda_0$ — кути та відстань, що визначають зміщення центра шуканого еліпсоїда від центра мас, x_0, y_0, z_0 — лінійні величини, що визначають зміщення шуканого еліпсоїда, T — точка на фізичній поверхні Землі; H — висота точки T над рівнем моря; $OT = r$; $OO = \rho_0$; $OT = \rho_0$; $TT = h$; $OT = r$.

Прийmemo за фігуру Землі загальноземний еліпсоїд. Розмір і орієнтування еліпсоїда E_L визначимо з умови h^2 min, тобто сума квадратів віддалей між визначуваним еліпсоїдом і поверхнею літосфери повинна бути мінімальною.

З рис. 3 визначимо висоту h фізичної поверхні над еліпсоїдом, параметри якого необхідно обчислити [8]:

$$h = r - \rho_0 \cos \theta_0, \tag{1}$$

$$\rho_0 \cos \theta_0 = a_0 (1 - e_0^2 \cos^2 \lambda_0), \tag{2}$$

$$a_0 (1 - e_0^2 \cos^2 \lambda_0) = H, \tag{3}$$

$$\cos \theta_0 = \cos \psi \cos \theta_0 \sin \lambda_0 + \sin \psi \cos \theta_0 \cos \lambda_0, \tag{4}$$

де a_0 — велика піввісь загальноземного еліпсоїда, e_0 — його стиснення, $\psi, \theta_0, \lambda_0$ — полярні координати в системі $OXYZ$.

Для радіуса-вектора еліпсоїда маємо:

$$r = a_0 (1 - e_0^2 \cos^2 \lambda_0), \tag{5}$$

де a — велика піввісь визначуваного еліпсоїда, μ — його стиснення, θ, ϕ, ψ — полярні координати в системі $O X Y Z$.

Якщо прийняти за одиницю довжини a_0 і $a = a_0 + \Delta a$, то підставивши формули (2)—(5) у вираз (1) і нехтуючи при цьому величинами $\Delta a/a$ та $\Delta a^2/a^2$, після простих перетворень отримаємо

$$h = A \cos \theta \cos \phi \cos \psi + B \sin \theta \cos \phi \cos \psi + C \sin \theta \sin \phi \cos \psi + D \cos^2 \theta + K \sin 2\theta \cos \phi \cos \psi + M \sin 2\theta \sin \phi \cos \psi + a H, \quad (6)$$

де коефіцієнти виражаються формулами

$$\begin{aligned} A &= a_0^2 \cos^2 \theta_0, \\ B &= a_0^2 \sin \theta_0 \cos \theta_0 \cos \phi_0, \\ C &= a_0^2 \sin \theta_0 \sin \theta_0 \sin \phi_0, \\ D &= a_0^2 (1 - \mu^2), \\ K &= (1 - \mu^2) \sin 2\theta_0, \\ M &= (1 - \mu^2) \cos 2\theta_0, \\ a &= a_0 + \Delta a. \end{aligned} \quad (7)$$

Величини, які встановлюють розміри і орієнтацію шуканого еліпсоїда, легко знайти, якщо відомі коефіцієнти (7). Знайдемо їх, використавши відомий параметричний метод розв'язку способу найменших квадратів [3]:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L}), \quad (8)$$

де \mathbf{X} — матриця-стовбець шуканих величин A, B, C, D, K, M, a розмірності $k = 7$, \mathbf{A} — матриця коефіцієнтів при невідомих розмірністю $k = n$, \mathbf{P} — вагова матриця розмірністю $n = n$, \mathbf{L} — матриця-стовбець вільних членів розмірністю $n = 7$, n — кількість точок на фізичній поверхні, k — кількість невідомих.

З системи (7) знайдемо кути та відстань, що характеризують зміщення центра шуканого еліпсоїда x_0, y_0, z_0 , його стиснення μ , два з трьох кутів Ейлера θ, ϕ, ψ та велику піввісь a :

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \arctg \frac{\sqrt{B^2 + C^2}}{A}, & \phi_0 &= \arctg \frac{C}{B}, \\ x_0 &= \sqrt{A^2 - B^2 - C^2}, & \mu &= \frac{D}{1 - a}, & \psi_0 &= \arctg \frac{K}{M}, \\ \mu &= \frac{K}{(1 - a) \sin 2\theta_0}, & a &= 1 - \mu. \end{aligned} \quad (9)$$

Щоб знайти лінійні величини, що встановлюють зміщення шуканого еліпсоїда та малу піввісь b , скористаємося рівностями

$$x_0 = b \cos \theta_0, \quad y_0 = b \sin \theta_0 \cos \phi_0, \quad z_0 = b \sin \theta_0 \sin \phi_0, \quad b = a(1 - \mu). \quad (10)$$

Для оцінки точності параметрів апроксимаційного еліпсоїда здій-
снимо обчислення вектора відхилень відомих висот поверхні літосфе-
ри від знайденого еліпсоїда та середню квадратичну похибку (СКП)
одиниці ваги за формулами:

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{AX} - \mathbf{L}}{\sqrt{\frac{\mathbf{V}^T \mathbf{PV}}{n-7}}}, \quad (11)$$

$$\sqrt{\frac{\mathbf{V}^T \mathbf{PV}}{n-7}}. \quad (12)$$

Щоб оцінити точність визначення величин x_0, y_0, z_0, a, b , ви-
користаємо правила перетворення коваріаційної матриці [3]:

$$\mathbf{Q}_X = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}, \quad (13)$$

$$\mathbf{C}_T = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Q}_X \mathbf{T}^T, \quad (14)$$

де \mathbf{T} — матриця, що виражає функціональний зв'язок між коефіцієн-
тами (7) та змінними (8):

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \frac{A}{B} & \frac{A}{B} & \frac{A}{B} & \dots & \frac{A}{B} \\ \frac{0}{C} & \frac{0}{C} & \frac{0}{C} & \dots & \frac{0}{C} \\ \frac{0}{a} & \frac{0}{a} & \frac{0}{a} & \dots & \frac{0}{a} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{0}{a} & \frac{0}{a} & \frac{0}{a} & \dots & \frac{0}{a} \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Середню квадратичну похибку шуканих параметрів x_0, y_0, z_0, a, b
, a обчислимо як добуток СКП одиниці ваги на діагональні члени
матриці \mathbf{C}_T :

$$\begin{aligned} m_{x_0} &= \sqrt{C_{T_{11}}}, \\ m_{y_0} &= \sqrt{C_{T_{22}}}, \\ m_a &= \sqrt{C_{T_{77}}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Аналогічна процедура реалізується для визначення СКП парамет-
рів x_0, y_0, z_0, b . Для цього у виразі (14) замінимо матрицю \mathbf{T} на матрицю
 \mathbf{S} :

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \frac{A}{x_0} & \frac{A}{y_0} & \frac{A}{z_0} & \dots & \frac{A}{b} \\ \frac{0}{C} & \frac{0}{C} & \frac{0}{C} & \dots & \frac{0}{C} \\ \frac{0}{a} & \frac{0}{a} & \frac{0}{a} & \dots & \frac{0}{a} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{0}{x_0} & \frac{0}{y_0} & \frac{0}{z_0} & \dots & \frac{0}{b} \end{pmatrix}, \quad (17)$$

де S — матриця, що виражає функціональний зв'язок між коефіцієнтами (7) та змінними (9). Отже, маємо

$$C_s = S^{-1} Q_x S^T, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} m_{x_0} &= \sqrt{C_{s_{11}}}, & m_{y_0} &= \sqrt{C_{s_{22}}}, \\ m_{z_0} &= \sqrt{C_{s_{33}}}, & m_b &= \sqrt{C_{s_{44}}}. \end{aligned} \quad (19)$$

ВИБІР ВХІДНИХ ДАНИХ

Для обчислень параметрів двовісного еліпсоїда використовувались два типи даних: цифрова модель висот поверхні Землі ETOPO1 [12] (це дворівнева модель з шаром криги і без неї, крок моделі 1°) та дані з бази даних SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) [13]. Для моделі ETOPO1 висоти були усереднені у межах трапецій $5^\circ \times 5^\circ$ (рис. 4). В результаті було отримано 2592 значень висот поверхні літосфери h , на основі яких обчислювались параметри двовісного еліпсоїда. За вагу кожного значення висоти h була прийнята площа відповідної трапеції:

$$P = \cos B, \quad (27)$$

де B — середня широта відповідної трапеції.

Вхідні дані з бази даних SOPAC були завантажені за допомогою утиліти SECTOR на першу добу кожного року, починаючи з 2001 р. і закінчуючи 2016 р. Такий діапазон даних не випадковий, тому що з 2001 р. у базі даних нараховувалось 2593 перманентних станцій, розміщення яких показано на рис. 5. Виміри на станціях проаналізовані в центрах опрацювання даних SIO і JPL. Координати перелічених перманентних станцій приведено на сервісі SOPAC до однієї системи координат ITRF2008, а геодезичну широту, довготу і висоту віднесено до системи WGS84.

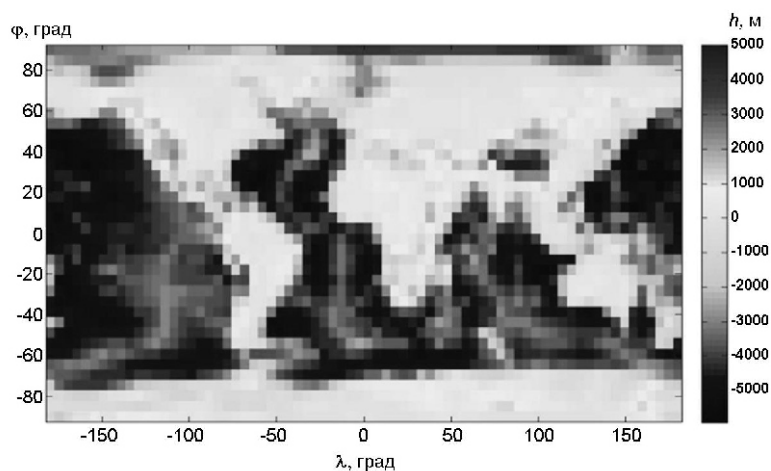


Рис. 4. Усереднена у межах трапецій $5^\circ \times 5^\circ$ модель висот фізичної поверхні Землі ETOPO1 в метрах

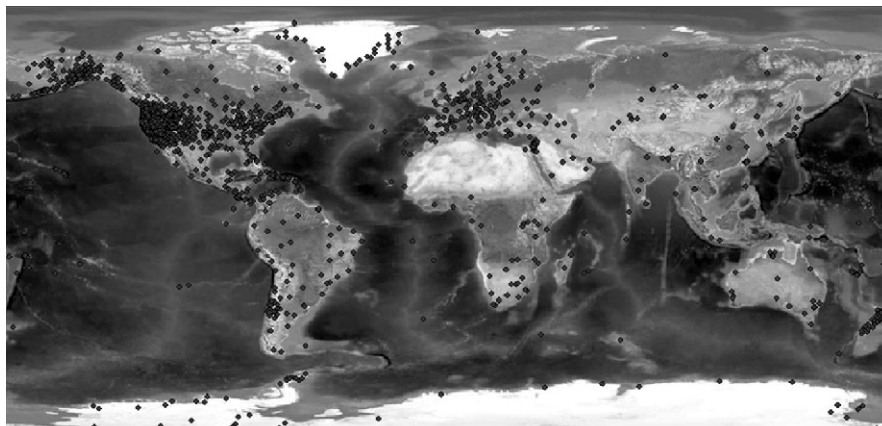


Рис. 5. Розміщення постійних станцій на поверхні Землі

Для моделювання трансформації фігури Землі у далекі геологічні епохи використані растрові карти палеорекострукцій розміщення материків і водної поверхні (рис. 6), які були створені професором Ронам Блекі в Університеті Північної Арізони [10].

Перед нами постало завдання: у межах обґрунтованої невизначеності отримати цифрові моделі висот поверхні Землі за растровими зображеннями геологічних епох.

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 немає навіть наближених даних про висоти фізичної поверхні. Оскільки всі растрові зображення створено 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 кольорних складових (R , G , B) з певним рівнем яскравості, то на основі апроксимації заданої функції, що описується трьома змінними, можна отримати значення коефіцієнтів моделі. ЦМП ETOPO1 була усереднена до піксельної структури кольорного зображення, яке в чорно-білому вигляді показане на рис. 4. Отже, наприклад, якщо розміри зображення 750 1500 пкл, то ЦМП буде відповідати аналогічним розмірам. Для кожного пікселя отримуємо відповідне значення висоти та три значення кольорних яскравостей, які вигідно представляти у вигляді поліноміального рівняння:

$$F(h) = \sum_{m=0}^n a_m R^i G^j B^k, \quad i, j, k \leq m, \quad (28)$$

де h — значення висоти відповідного пікселя; R , G , B — три складових кольору відповідного пікселя; a — невідомі коефіцієнти.

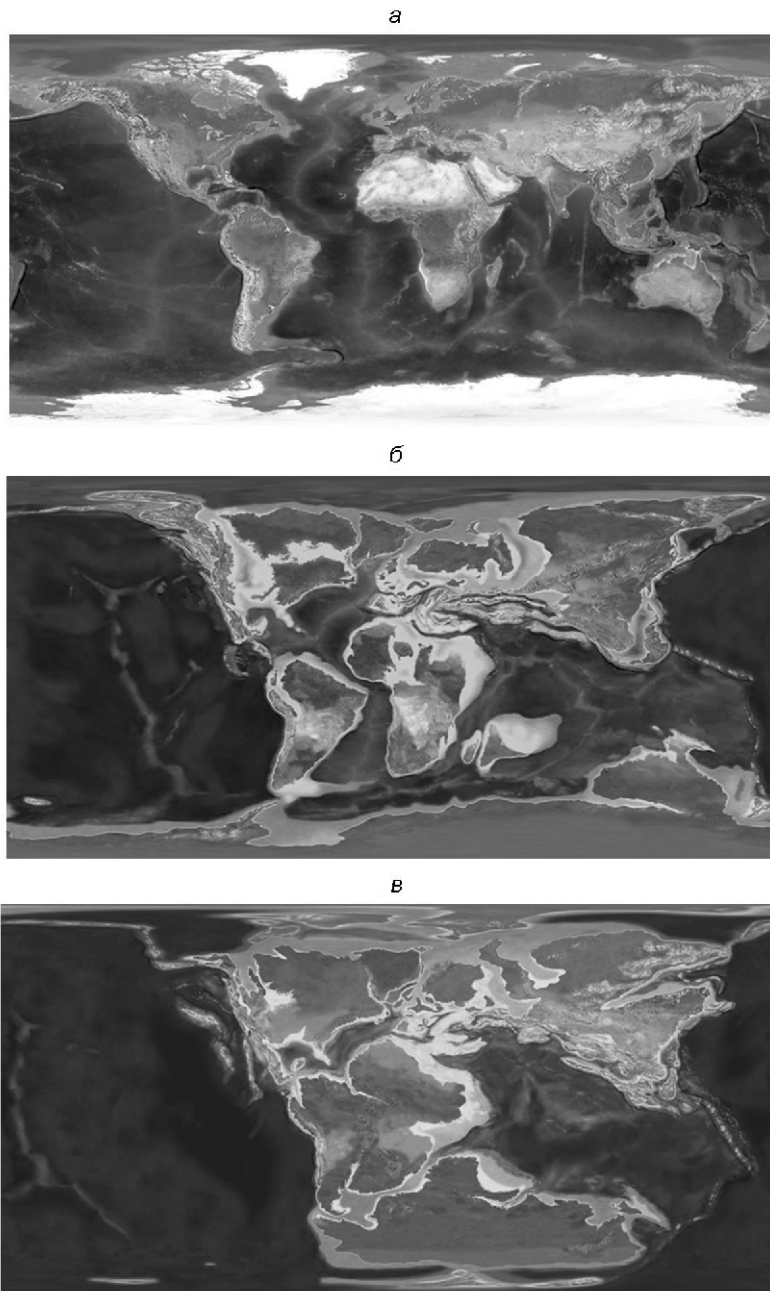


Рис. 6. Палеореко́нструкції розміщення материків: *a* — теперішній час, *б* — 90 млн років тому, *в* — 150 млн років тому [10]

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

$$F(h) \quad a_1 \quad a_2 R \quad a_3 G \quad a_4 B \quad a_5 RG \quad \dots \quad a_{25} GB^3. \quad (29)$$

Невідомі коефіцієнти можна обчислити, використавши спосіб найменших квадратів. З правої частини рівняння (29) формується матриця коефіцієнтів при невідомих, а ліва — виступає у ролі вектора

вільних членів. За вагову матрицю приймемо одиничну діагональну матрицю. За результатами моделювання було визначено, що для апроксимації кольорів пікселів найкраще використовувати лише перші 19 коефіцієнтів рівняння (29).

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХНЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЯ

Згідно із запропонованим алгоритмом апроксимації двовісним еліпсоїдом висот фізичної поверхні Землі, описаних різним набором даних, були отримані результати, які характеризують сім його параметрів в сучасний період і для різних минулих геологічних епох.

У графі 2 табл. 1 подано параметри двовісного еліпсоїда, обчислені за даними цифрової моделі поверхні Землі ETOPO1, висоти якої були усереднені в межах трапецій 5×5 по всій поверхні планети. В наступних двох графах подано параметри еліпсоїда, обчислені за даними висот поверхні Землі ETOPO1 для північної і південної півкуль.

Звернемо увагу на те, що полюси отриманих еліпсоїдів не збігаються з полюсами Землі, тобто екваторіальна площина літосфери не збігається з екваторіальною площиною геоїда, і кут нахилу становить 2.6 або 289 км по дузі меридіана. Структурна асиметрія північної і південної півкуль також явно відстежується (графи 3 і 4 табл. 1), а це означає, що є видовження широтних кіл південної півкулі і укорочення довжин широтних кіл північної півкулі, тобто наявність розширення південної півкулі і стиснення північної півкулі відносно центра фігури поверхні літосфери Землі. Зміщення центра мас відносно центра фігури також характерне для Землі.

Таким чином, відзначені планетарні параметри фігури поверхні літосфери, приймаючи до уваги фігуру геоїда, під впливом гравітації, обертового руху, ендегенних і екзогенних факторів можуть перебувати в динамічно змінному стані. На підтвердження цього припущення ми використали з бази даних SOPAC за період з 2001 р. по 2016 р. дані ГНСС-спостережень для 2593 перманентних станцій, розміщених нерівномірно на материках у північній і південній півкулях та викона-

Таблиця 1. Параметри двовісного еліпсоїда

Параметри	Вся планета	Північна півкуля	Південна півкуля
, м	1677.36 ± 164.90	2238.49	7287.28
, град	32.044 ± 0.052	33.436	0.307
, град	33.528 ± 0.001	18.358	2.501
a, м	6375117.01 ± 169.04	6375114.92	6376300.87
b, м	6355640.09 ± 274.83	6355772.53	6362552.68
1/	327.32 ± 6.32	329.59	463.79
, град	133.773 ± 0.019	159.308	110.029
, град	2.613 ± 0.031	2.610	2.775

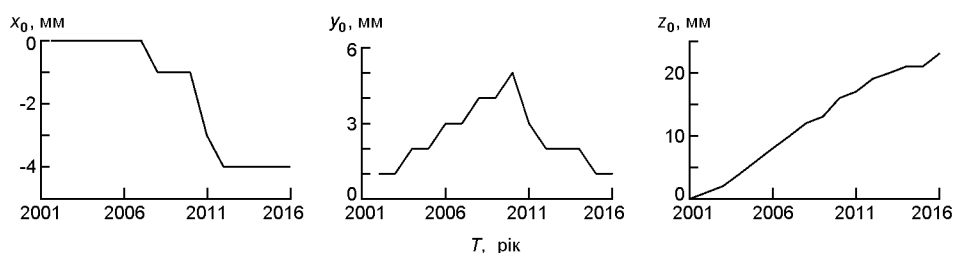


Рис. 7. Зміщення центра мас Землі, отримані апроксимацією двовісним еліпсоїдом поверхні літосфери

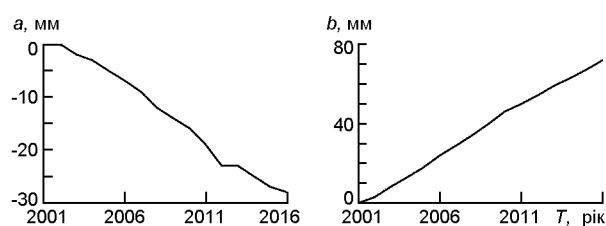


Рис. 8. Зміна півосей двовісного еліпсоїда

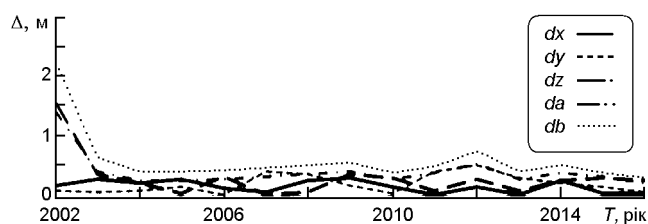


Рис. 9. СКП визначення зміни параметрів двовісного еліпсоїда

ні з цим набором даних на початок кожного року обчислення параметрів двовісного еліпсоїда. На рис. 7 і 8 показано графіки зміщень центра мас і величини зміни півосей двовісного еліпсоїда на вказаному часовому інтервалі, а на рис. 9 — СКП визначення варіацій цих параметрів.

У першу чергу відзначимо, що на рис. 8 чітко відстежується майже лінійне збільшення малої півосі і зменшення великої півосі еліпсоїда з часом. Лінійна залежність від часу спостерігається і у зміні положення центра мас по осі Z , тобто у напрямку до північного полюса Землі. Виявлена закономірність не може вважатись випадковою на рівні статистичної невизначеності, хоча величини варіацій цих параметрів за один рік характеризуються малими значеннями, близькими до СКП, але лінійний тренд явно відстежується.

Відзначимо, що подібну закономірність раніше було виявлено під час визначення вертикальної складової середньої швидкості переміщення для 27 перманентних станцій південної півкулі. Ця швидкість складала 1.37 мм/рік. У північній півкулі 66 станцій мають додатні вертикальні швидкості, а інші 85 — від'ємні, так що середня швидкість 151 станції складала 0.06 мм/рік [1]. Можлива асиметрія деформації півсфер є ілюстрацією змінності середнього радіуса Землі.

Таблиця 2. Швидкості вікового збільшення середнього радіуса Землі

Область	Сучасна епоха, мм/рік	Від 600 млн р. до нашого часу, мм/рік
Ціла планета	+0.3	+0.001
Північна півкуля	+6.4	+0.003
Південна півкуля	+0.2	+0.002

Перші оцінки швидкості вікового збільшення середнього радіуса Землі в сучасну епоху склали 0.22 — 0.23 мм/рік [1, 14]. Отримані нами результати, наведені в другій графі табл. 2, зіставні з попередніми оцінками швидкості вікового збільшення середнього радіуса Землі.

Отже, виявлену закономірність змін півосей еліпсоїда можна було б пояснити сповільненням обертового руху Землі навколо своєї осі, однак дані Міжнародної служби обертання Землі (IERS) не підтверджують це припущення. Інше пояснення цієї закономірності може бути пов'язане з переміщенням земного ядра і континентальних мас кори в напрямку до півночі, про що аргументовано свідчать результати швидкості зміни радіуса для північної і південної півкулі (табл. 2) та часовий фактор зміщення центра мас по відношенню до центра фігури (рис.7, в).

Розглянемо тепер 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. назад. Звернемо насамперед увагу на траєкторію місць розташування північного полюса двовісного еліпсоїда, що апроксимує поверхню літосфери Землі у різні періоди геологічної історії (рис. 10). Максимальне відхилення полюса малої півосі серед отриманих еліпсоїдів від північного полюса Землі не перевищує 2.6 (мабуть, значення, близьке до критичного), що підтверджує висловлене раніше припущення про переміщення літосферних плит, яке підпорядковується геодинамічному процесу, направленому на відновлення осьової симетрії і збереженню моменту кількості обертання. З отриманих розрахунків також випливає, 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 і південної півкулі протягом 600 млн р. показано на рис. 11, а швидкості цих змін подано у табл. 2.

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. [2]). Так, наприклад, Н. Павленкова [6] приводить такі докази щодо розширення Землі.

1. Утворення Тихого океану, оконтуреного кільцем зон високої сейсмічності, що має правильну форму і майже під прямим кутом

Рис. 10. Траєкторія місця розташування північного полюса двовісного еліпсоїда, що апроксимує поверхню літосфери Землі в різні періоди протягом 600 млн р.

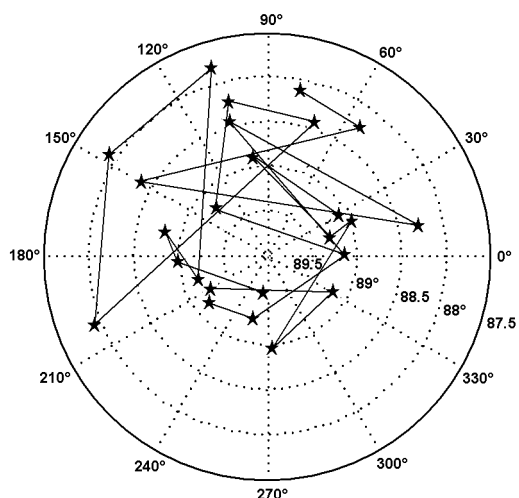
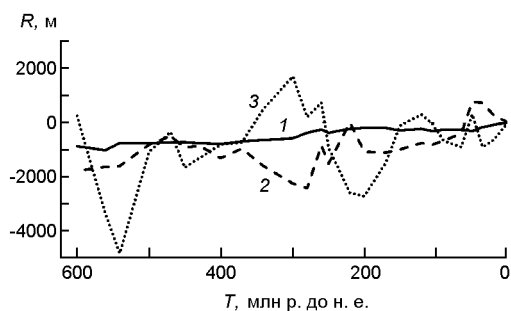


Рис. 11. Зміна середнього радіуса Землі протягом 600 млн р.: 1 — середній радіус Землі, 2 — середній радіус північної півкулі, 3 — середній радіус південної півкулі



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

2. Геометричну форму серединно-океанічних хребтів, яка відстежується через всю планету у вигляді зон підвищеної водневої дегазації, також можна інтерпретувати з позицій розширення Землі з більш інтенсивним розширенням південної півкулі, про що свідчить грушовидна форма планети.

3. Модель розширення Землі дозволяє пояснити переміщення літосферних плит із збереженням їхніх глибоких коренів, наявність в океанах блоків континентальної кори і давній вік океанічної кори.

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

Таким чином, 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 у сучасну епоху.

ВИСНОВКИ

Дотепер багато дослідників не виключали, що радіус Землі може змінюватися. Проведені нами дослідження фігури поверхні літосфери у вигляді двовісного еліпсоїда, який найкращим чином підходить до названої поверхні за даними ГНСС-спостережень на 2593 перманентних станціях показав, що мала піввісь збільшилась на 72 мм, а велика піввісь, навпаки, зменшилась на 25 мм з 2001 по 2016 рр. Середній радіус Землі за цей період часу збільшився майже на 5 мм із швидкістю 0.3 мм/рік.

Якщо взяти до уваги результати апроксимації двовісним еліпсоїдом даних ГНСС-спостережень у північній і південній півкулях, то швидкості змін середнього радіуса відповідно будуть становити 6.4 мм/рік і 0.2 мм/рік. Це наводить на думку щодо можливого вікового дрейфу ядра відносно мантиї у північному напрямку, який може призводити до таких асиметричних деформацій, що відстежуються у результатах ГНСС-спостережень.

З іншого боку, залишається дискусійним питання збільшення середнього радіуса Землі. Однак отримані нами оцінки змін середнього радіуса Землі перевищують межу СКП їхнього визначення і тому можна припустити, що трендова складова збільшення радіуса Землі де-факто відстежується. Збільшення середнього радіуса Землі підтверджується й 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. назад.

Інтерпретація проведених досліджень показала, що сценарій розширення Землі у процесі її еволюції цілком можливий. Цікавими виявилися також результати проектування малої осі двовісного еліпсоїда на поверхню літосфери. Так, максимальне відхилення полюса малої півосі від північного полюса Землі не перевищує 2.6 для 26 отриманих еліпсоїдів, які апроксимують поверхню літосфери для різних геологічних епох, що може вказувати на критичну величину відхилення географічного полюса від осі обертання Землі для будь-якої конфігурації розміщення материків і водної поверхні.

1. Баркин Ю. В. Вековые вариации фигуры Земли в современную эпоху // Современное состояние наук о Земле. — М.: Изд-во Геологический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011.—С. 183—187.
2. Блинов В. Ф. Растущая Земля: из планет в звезды [Электронный ресурс]. — Киев, 2011.—305 с.
3. Зазуляк П. М., Гавриш В. І., Євсєєва Е. М. і ін. Основи математичного опрацювання геодезичних вимірювань. — Навчальний посібник. — Львів: Растр-7, 2007. —408 с.
4. Менард Г. У. Геология дна Тихого океана. — М.: Мир, 1966.—275 с.
5. Мецєряков Г. А., Церклевич А. Л. Гравитационное поле, фигура и внутреннее строение Марса. — Киев: Наук. думка, 1987.—240 с.

6. Павленкова Н. И. Нерешенные проблемы глобальной тектоники и возможные пути их решения [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=deVM7FB29FE>
7. Тяпкин К. Ф., Кивелюк К. Ф. Изучение разломных структур геолого-геофизическими методами. — М.: Недра, 1982.—239 с.
8. Церклевич А. Л. Определения размеров и ориентировки обобщенной фигуры Марса // Письма в Астрон. журн.—1977.—3, № 12.—С. 562—565.
9. Церклевич А. Л., Заяць О. С. Геодинамічна еволюція фігури Землі та Марса // Геодинаміка.—2012.—№ 2 (13).—С. 38—42.
10. Blakey R. Global Paleogeography [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www2.nau.edu/rcb7/globaltext2.html>.
11. Maloof A. C., Halverson G. P., Kirschvink J. L., et al. Combined paleomagnetic, isotopic, and stratigraphic evidence for true polar wander from the Neoproterozoic Akademikerbreen Group, Svalbard, Norway // Geol. Soc. Amer. Bull.—2006.—118, N 9/10.—P. 1099—1124.
12. National Centers for Environmental Information, ETOPO1 Global Relief Model [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>.
13. Scripps Orbit and Permanent Array Center database [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://sopac.ucsd.edu/sector.shtml>.
14. Wu X., Collilieux X., Altamimi Z., et al. Accuracy of the international terrestrial reference frame origin and Earth expansion // Geophys. Res. Lett.—2011.—38, N 13.—P. 124—129.

Стаття надійшла до редакції 07.07.16