

Геодинамічна еволюція фігури і неоднорідний розподіл густини Землі

А.Л. Церклевич, О.С. Заяць, М.М. Фис, 2025

Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

Наведено результати і їх інтерпретація в дослідженні планетарних розподілів густини та енергії в еліпсоїдальній планеті із використанням додаткової умови — мінімуму гравітаційної енергії Землі. Визначено компоненти градієнта розподілу густини, які характеризують горизонтальні переміщення неоднорідних мас.

Ключові слова: модель PREM будови Землі, гармонічні коефіцієнти геопотенціалу, гравітаційна енергія, горизонтальні градієнти розподілу густини.

Вступ. В останній час вивчення внутрішньої будови Землі базується на отриманні і опрацюванні експериментальних даних структурної сейсмології з їх перерахунком у моделі розподілу густини. У статті [Фис, Церклевич, 2021] подано розв'язок задачі зображення кусково-неперервної функції розподілу густини для сферичної стандартної моделі PREM [Dziewonski, Anderson, 1981] многочленами Лежандра для обчислення розподілу густини потенціалу та енергії в еліпсоїдальній планеті із використанням додаткової умови — мінімуму гравітаційної енергії. В отриманій моделі є надлишок гравітаційної енергії, який зосереджений у внутрішньому і найбільше у зовнішньому ядрі Землі, а також у корі планети. Загальне значення енергії E для моделі PREM, яка розбита на еліпсоїдальні прошарки, становить $2,3364 \cdot 10^{24}$ ГДж, а в модифікованій моделі PREM після корегування її за гідростатичною складовою — $2,2828 \cdot 10^{24}$ ГДж. Переконаливим аргументом на користь достовірності побудованої моделі було зменшення гравітаційної енергії для модифікованої моделі PREM на 19 %, що опосередковано підтверджує ступінь негідростатичної складової сучасної Землі приблизно у 22 % за результа-

тами порівняння стиснення «гідростатичного» сфероїда $-1/\alpha=1/232$ і стиснення сфероїда за супутниковими даними — $1/\alpha=1/298$.

Ключовою проблемою в інтерпретації планетарних аномалій гравітаційного поля є розділення збурювальних впливів кори і мантії. Вважається, що менші за порядком гармоніки в розкладі гравітаційного поля зумовлені насамперед неоднорідними масами глибинної частини мантії планети, тоді як більші за порядком гармоніки відображають будову верхньої частини мантії [Церклевич та ін., 2022]. Проаналізувавши літературні джерела, можна зазначити, що планетарні аномалії сили тяжіння інтерпретують по-різному [Hedlin et al., 1997; Церклевич та ін., 2022]. Так, до можливих причин, які впливають на аномальне гравітаційне поле Землі, можна віднести неоднорідності розподілу мас, спричинені геодинамічними і термопружними напруженнями, температурними неоднорідностями мантії, існуванням первинних неоднорідностей, утворених на початковій стадії еволюції планети, теплову і гравітаційну конвекцію в мантії, фазові переходи в мантії тощо.

Результати досліджень. Параметри

зовнішнього гравітаційного поля планети містять узагальнену інформацію про її внутрішню будову: кожна гармоніка потенціалу відображає інтегральну умову, якій задовольняє розподіл густини планети. Аналіз побудованих на підставі параметрів гравітаційного поля та інших даних тривимірних моделей розподілу густини Землі виявив, що довгохвильові аномалії сили ваги Землі пов'язані з неоднорідностями розподілу густини, які зосереджені переважно у шаровій оболонці тектоносфери до глибин ~ 1000 км [Тараканов, Черевко, 1978; Церклевич та ін., 2022].

У статті [Dziewonski et al., 1977] вперше у результаті опрацювання даних сейсмічної томографії було отримано сферичні коефіцієнти розкладу аномалій швидкостей до 3-го порядку для п'яти оболонок (0—670 км, 670—1100 км, 1100—1500 км, 1500—2200 км, 2200—2886 км). На рис. 1, запозиченому з цієї роботи, наведено розподіл аномалій швидкостей у прошарку 0—670 км. Отримана модель демонструє високий рівень збурень нижче глибини 670 км — скачка густини та вище межі ядра та мантії, де максимальні збурення досягають 1—1,5 % середньої швидкості

навіть для цієї сильно згладженої моделі. Найбільш вражаючою великомасштабною тривимірною особливістю моделі є кільце високих швидкостей, що огинає басейн Тихого океану в діапазоні глибин від 1000 км до межі ядра та мантії.

Вибір для подальшої інтерпретації аномалій швидкостей в цьому шарі зумовлений двома обставинами: по-перше, центри мас джерел великомасштабних аномалій сили тяжіння, за розрахунками [Тараканов, Черевко, 1978], залягають на глибинах близько 700—900 км, по-друге, до цієї глибини ще простежується значуща кореляція аномалій швидкостей (рис. 1) з аномаліями густини (рис. 2).

На цих картах спостерігається також зростання густини від екватора до полюсів, тому можна припустити, що гармонічні коефіцієнти 2-го порядку розкладу гравітаційного поля відображають тривісність фігури й відхилення еліпсоїдального стиснення від гідростатично рівноважного стану Землі, а ці відхилення, ймовірно, підтримуються внаслідок дії статичних напружень у нижній мантії планети. Таким чином, хоча висновки, зроблені тут щодо походження найнижчих порядків

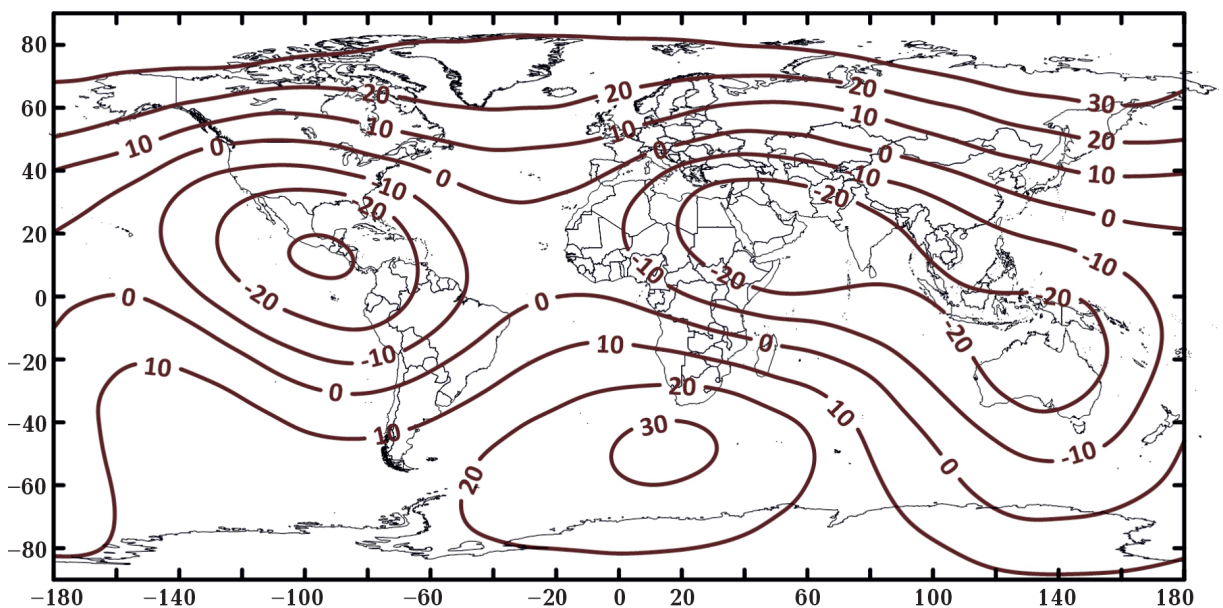


Рис. 1. Аномалії швидкості ΔV_p у шарі 0—670 км, за даними [Dziewonski et al., 1977].

Fig. 1. Velocity anomalies in the 0—670 km layer according to [Dziewonski et al., 1977].

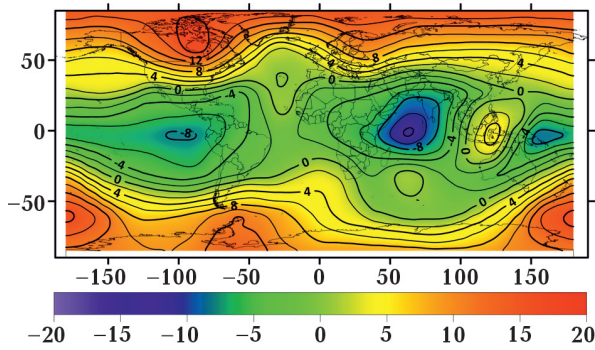


Рис. 2. Розподіл аномальної густини $\Delta\rho$ Землі, зумовлений гармонічними коефіцієнтами до 12-го порядку на глибині 700 км. Ізолінії проведені через $2 \cdot 10^{-1} \text{ кг/м}^3$.

Fig. 2. Distribution of the Earth's anomalous density $\Delta\rho$ caused by harmonic coefficients up to the 12th order at a depth of 700 km. The isolines are drawn at intervals of $2 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^3$.

поля геопотенціалу, не є переконливими, вони вказують на спосіб, у який результати сейсмології можуть бути використані для вирішення деяких основних питань геодинаміки.

Побудована модель тривимірного розподілу густини з урахуванням гармонік до 12-го порядку також виявляє компенсаційний механізм геостазії в перерозподілі

неоднорідних мас на глибинах від 200 до 3000 км. Наочно таку особливість розподілу аномальної густини вздовж радіуса у довільно вибраних напрямках (серед них екстремальних значень висот геоїда) ілюструють профілі аномалії густини $\Delta\rho$, зображені на рис. 3. Тут можна побачити, що вздовж радіуса для кожного напрямку додатні і від'ємні значення аномалії густини переважно частково взаємно скомпенсовані. Однак для Індійського мінімуму висоти геоїда ($\varphi=5^\circ$; $\lambda=80^\circ$; $\zeta=-105 \text{ м}$) екстремальне від'ємне значення аномальної густини досягається в зовнішньому ядрі і компенсація впродовж радіуса відсутня. Зміни аномальної густини вздовж радіуса для інших характерних напрямків засвідчують, що неоднорідні маси переважно сконцентровані у верхній і нижній мантії. Крім того, зазначимо, що повна геостатична компенсація досягається лише для двох профілів уздовж радіуса (№ 7 і 4 — сумарні аномальні маси вздовж радіусів близькі до нуля). Також зауважимо, що для інших профілів сумарна аномальна густина вздовж радіусів змінюються від +1 до $-6,3 \text{ кг/м}^3$. Якщо прийняти відсутність компенсації аномальної густини для Індійського мінімуму висоти геоїда за 100 %, то

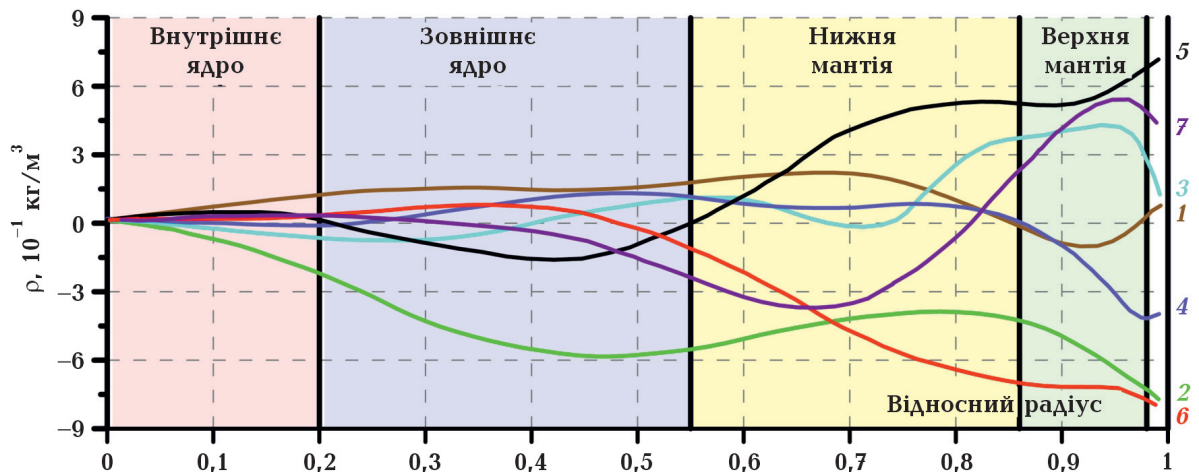


Рис. 3. Графіки розподілу аномальної густини $\Delta\rho$ Землі вздовж радіуса в напрямках вибраних значень висот геоїда в точках з координатами: 1 — $\varphi=3^\circ$, $\lambda=145^\circ$, $\zeta=79 \text{ м}$; 2 — $\varphi=5^\circ$, $\lambda=80^\circ$, $\zeta=-105 \text{ м}$; 3 — $\varphi=50^\circ$, $\lambda=-10^\circ$, $\zeta=59 \text{ м}$; 4 — $\varphi=30^\circ$, $\lambda=-70^\circ$, $\zeta=-51 \text{ м}$; 5 — $\varphi=-55^\circ$, $\lambda=50^\circ$, $\zeta=41 \text{ м}$; 6 — $\varphi=20^\circ$, $\lambda=-120^\circ$, $\zeta=-47 \text{ м}$; 7 — $\varphi=0^\circ$, $\lambda=-60^\circ$, $\zeta=-13 \text{ м}$.

Fig. 3. Anomalous density distribution along the radius in the directions of the selected geoid heights at points 1 — $\varphi=3^\circ$, $\lambda=145^\circ$, $\zeta=79 \text{ м}$; 2 — $\varphi=5^\circ$, $\lambda=80^\circ$, $\zeta=-105 \text{ м}$; 3 — $\varphi=50^\circ$, $\lambda=-10^\circ$, $\zeta=59 \text{ м}$; 4 — $\varphi=30^\circ$, $\lambda=-70^\circ$, $\zeta=-51 \text{ м}$; 5 — $\varphi=-55^\circ$, $\lambda=50^\circ$, $\zeta=41 \text{ м}$; 6 — $\varphi=20^\circ$, $\lambda=-120^\circ$, $\zeta=-47 \text{ м}$; 7 — $\varphi=0^\circ$, $\lambda=-60^\circ$, $\zeta=-13 \text{ м}$.

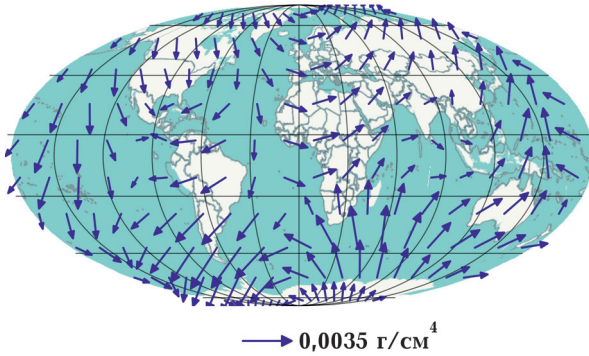


Рис. 4. Зображення векторних похідних $\partial\delta/\partial x_1$, $\partial\delta/\partial x_2$ розподілу аномалій густини на глибині 700 км.

Fig. 4. Vector derivatives $\partial\delta/\partial x_1$, $\partial\delta/\partial x_2$ of the density anomaly distribution at a depth of 700 km.

геоізостатична недокомпенсація для всіх інших профілів буде змінюватись від 1 (№ 4) до 57 % (№ 6).

Важливою інформацією для планетарної геодинаміки є визначення компонент градієнта $\partial\delta/\partial x_1$, $\partial\delta/\partial x_2$ розподілу густини, які характеризують горизонтальні переміщення неоднорідних мас [Церклевич та ін., 2022]. Їх найкраще відображати у вигляді вектор-діаграм напрямків горизонтальних переміщень мас (рис. 4). Тут чітко простежується зародження в екваторіальній зоні двох вихрових потоків, які охоплюють екваторіальну частину Південної Америки та Індонезію з прилеглими океанічними островами від Австралії до Південного Китаю. Все це дає підстави для припущення, що переміщення континентів пов'язане з тангенціальними силами, які генеруються в тектоносфері через наявність неоднорідних мас.

Експериментальним підтвердженням неоднорідної структури Землі є дані щодо аномалій швидкостей поширення сейсмічних хвиль, які виявлені за результатами сейсмічної томографії у верхній та нижній мантії і навіть у оболонках, що примикають до ядра, а також у зовнішньому і внутрішньому ядрі Землі [Hedlin et al., 1997]. Всі ці факти обґрунтовують висновок про відхилення структури оболонок Землі від гідростатично рівноважного стану, що є визначальним чинником для досліджень у планетарній геодинаміці.

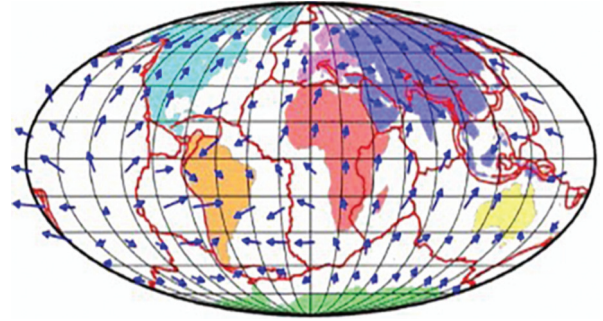


Рис. 5. Модель дрейфу материків на сучасному етапі. Максимальна довжина стрілки відповідає швидкості мантійних течій — 12 см/рік [Трубицын, 2019].

Fig. 5. Model of the current continental drift. The maximum length of the arrow corresponds to the speed of mantle currents — 12 cm/year [Trubitsyn, 2019].

На сьогодні більшість авторитетних геофізиків і геологів дійшли висновку, що основною рушійною силою тектоніки плит є загальномантійна теплова конвекція. У статті [Трубицын, 2019] отримано моделі, які показують еволюцію мантійної конвекції з урахуванням взаємодії з усіма шістьма континентами та великими островами реальної форми. На рис. 5 показано числову модель дрейфу континентів, запозичену з цієї роботи. У разі порівняння векторів горизонтального переміщення неоднорідних мас на глибині 700 км (див. рис. 4) з векторами швидкості мантійних течій (див. рис. 5) можна помітити загальні подібні закономірності у просторовому їх розміщенні. Зокрема, на цих рисунках чітко відстежується подібне розміщення векторів для континентальних територій, таких як Північна та Південна Америка, Австралія, Європа, Південна Африка. Менш подібну картину у напрямках розміщення векторів спостерігаємо лише для північної частини Африканського та східної частини Азійського континентів.

Висновки. Запропоновані методи передбачають апроксимацію дискретного розподілу неоднорідних мас кусково-неперервними функціями. Останнє припущення впливає із самої методики побудови тривимірних моделей розподілу густини і приводить до істотно згладжених значень аномалій густини у верхніх оболонках пла-

нети завдяки адитивному типу гравітаційного поля, коли сума полів (ефектів) окремих об'єктів дорівнює загальному полю. Латеральні аномалії розподілу густини і їх градієнти визначені за результатами математичного моделювання розв'язку

оберненої планетарної задачі гравіметрії, що може слугувати ефективним методом вивчення глобальних переміщень мантійних мас під дією гравітаційних сил, направлених на досягнення мінімуму гравітаційної енергії.

Список літератури

- Тараканов Ю.А., Черевко Т.И. Интерпретация крупнейших гравитационных аномалий Земли. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1978. № 4. С. 25—42.
- Трубицын В.П. Проблемы глобальной геодинамики. *Физика Земли*. 2019. № 1. С. 180—198. <https://doi.org/10.31857/S0002-333720191180-198>.
- Фис М.М., Церклевич А.Л. Вплив принципу мінімуму потенціальної енергії на розподіл густини і гравітаційної енергії Землі для моделі PREM. *Геофиз. журн.* 2021. № 1. Т. 43. С. 194—210. <https://doi.org/10.24028/vzh.0203-3100.v43i1.2021.225549>.
- Церклевич А.Л., Фис М.М., Шило Є.О., Заць О.С. *Планетарна геодинаміка: Фігура, гравітаційне поле, внутрішня будова Землі і планет земної групи*. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2022, 336 с.
- Dziewonski, A., & Anderson, D. (1981). Preliminary reference Earthmodel. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25, 297—356. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7).
- Dziewonski, A.M, Hager, B.H, & O'Connell, R.J. (1977). Large scale heterogeneities in the lower mantle. *Journal of Geophysical Research*, 82(2), 239—255. <https://doi.org/10.1029/JB082i002p00239>.
- Hedlin, M.A.H., Shearer, P.M., & Earle, P.S. (1997). Seismic evidence for small-scale heterogeneity throughout the Earth's mantle. *Nature*, 387, 145—150. <https://doi.org/10.1038/387145a0>.

Geodynamic shape evolution and inhomogeneous distribution of the Earth's density

A.L. Tserklevych, O.S. Zayats, M.M. Fys, 2025

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

The paper presents the results and their interpretation in the study of planetary distributions of density and energy in an ellipsoidal planet under an additional condition — the minimum gravitational energy of the Earth. Also, the components of the density distribution gradient characterizing the horizontal movements of inhomogeneous masses are determined.

Key words: PREM model of the Earth structure, harmonic coefficients of the geopotential, gravitational energy, horizontal gradients of the density distribution.

References

- Tarakanov, Y.A., & Cherevko, T.I. (1978). Interpretation of the largest gravitational anomalies of the Earth. *Izv. USSR AS. Earth Physics*, (4), 25—42 (in Russian).
- Trubitsyn, V.P. (2019). Problems of global geodynamics. *Physics of the Earth*, (1), 180—198. <https://doi.org/10.31857/S0002-333720191180-198>.

- Tserklevych, A.L., Fis, M.M., Shylo, E.O., & Zayats, O.S. (2022). *Planetary geodynamics: Shape, gravitational field, internal structure of the Earth and planets of the Earth group*. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 336 p. (in Ukrainian).
- Fis, M.M., & Tserklevich, A.L. (2021). Influence of the principle of minimum potential energy on the distribution of the Earth's density and gravitational energy for the PREM model. *Geophysical Journal*, 43(1), 194—210. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225549> (in Ukrainian).
- Dzewonski, A., & Anderson, D. (1981). Preliminary reference Earthmodel. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25, 297—356. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7).
- Dziewonski, A.M, Hager, B.H, & O'Connell, R.J. (1977). Large scale heterogeneities in the lower mantle. *Journal of Geophysical Research*, 82(2), 239—255. <https://doi.org/10.1029/JB082i002p00239>.
- Hedlin, M.A.H., Shearer, P.M., & Earle, P.S. (1997). Seismic evidence for small-scale heterogeneity throughout the Earth's mantle. *Nature*, 387, 145—150. <https://doi.org/10.1038/387145a0>.