

## ІЗОСТАЗІЯ ТА ІЗОСТАТИЧНІ МОДЕЛІ

А. Церклевич

Національний університет "Львівська політехніка"

**Ключові слова:** ізостазія, моделі.**Вступ**

Ізостазія – це важлива геотектонічна концепція, яка допомагає зрозуміти еволюцію основних елементів рельєфу поверхні планети. Основи загальної теорії ізостазії закладені Праттом та Ері в 1855 р. Близькість земної поверхні (як континентальної, так і океанічної) до ізостатичної рівноваги впливає з відомого факту близькості її форми до гідростатично рівноважного стану, тобто до такого становища, яке займала би планета, перебуваючи в рідкому стані. Хоча Земля не перебуває в такому стані, але ізостатичні сили та ізостатична рівновага цілком реальні. Логічно припустити, що до певної міри ізостазія характерна для інших планет. Отже, у зв'язку із значним прогресом у вивченні гравітаційного поля та топографії Землі і планет земної групи, проблеми ізостазії знову привернули увагу і тому виникає необхідність аналізу поширених підходів до вивчення ізостазії.

**Аналіз ізостатичних моделей**

Спочатку термін "ізостазія" був введений для визначення механічної рівноваги розподілу мас у зовнішній оболонці Землі. Тому під ізостазією (або станом ізостатичної компенсації) зазвичай розуміли врівноваження ваги поверхневих навантажень за допомогою аномалій густини під ними, розподілених так, що на деякій однаковій глибині тиск стає постійним і нижче від цієї глибини планета перебуває у стані гідростатичної рівноваги.

Розвиток досліджень у сфері ізостазії і перенесення цих досліджень на планети земної групи привів до перегляду й уточнення багатьох уявлень. Так, термін "ізостазія" набув ширшого значення: це і механічна рівновага літосфери [1], і динамічна рівновага [2], і тенденція до компенсації неоднорідностей мас глибоких горизонтів мантії [3] тощо. Проте в такому різноманітті підходів відзначається певна неоднозначність в розумінні ізостазії. Ма-

буть, тут йдеться тільки про моделі вивчення ізостатичного стану і про моделі процесів порушення і відновлення ізостазії, які самі по собі неоднозначні. Тому пошук нових альтернативних рішень і моделей ізостатичної рівноваги, які сприяли б оптимальному аналізу спостережуваних геофізичних даних і виконанню ефективної перевірки наявних моделей з метою вибору найадекватнішої моделі, є актуальним завданням у вивченні будови Землі та планет.

З урахуванням загальної схеми гідростатичної рівноваги поняттю "ізостазія" варто надати ширшого тлумачення, а саме: як прагнення мас, що утворюють планету, до стану мінімуму потенційної енергії, а також до підтримки умови [4]

$$\int_{t(\theta, \lambda)}^{R(\theta, \lambda)} \rho(r, \theta, \lambda) r^2 dr - \int_0^{R(\theta, \lambda)} \rho_n(r) r^2 dr = 0, \quad (1)$$

де  $r, \theta, \lambda$  – сферичні координати,  $t(\theta, \lambda)$  – висота денної поверхні,  $\rho(r, \theta, \lambda)$  – тривимірний розподіл густини,  $\rho_n(r)$  – сферично-симетричний розподіл густини.

Вираз (1) описує ізостатичну модель розподілу густини планети. Відхилення від неї реальних мас – це малі величини, які і підлягають вивченню.

Відомі методи побудови ізостатичних моделей для Землі ґрунтуються на розв'язанні прямої задачі гравіметрії в тривимірному варіанті. При цьому застосовують два методи [5, 6]. Перший оснований на обчисленнях аномалій тиску на передбачуваній глибині ізостатичної компенсації або на якій-небудь структурній межі, наприклад, межі Мохоровичича. Для обчислень використовують результати ГСЗ з подальшим перерахунком швидкостей сейсмічних хвиль в розподіл густини наявних мас відповідно до відомої емпіричної залежності між цими величинами. Другий підхід, поширеніший, оснований на обчисленнях

ізостатичних аномалій сили ваги. Для якісної оцінки повноти здійснення ізостазії зазвичай вводять умову рівноваги в теоретичне значення сили ваги. У такому разі ізостатичні аномалії сили ваги безпосередньо будуть вказувати на наявність мас, що не укладаються в схему ізостазії, модель якої береться для розрахунків. Умову рівноваги можна задати за допомогою деякої гіпотези про спосіб здійснення ізостазії. В практиці обчислення ізостатичних аномалій приймаються дві основні гіпотези – Ері і Пратта і їх модифікації.

У класичній моделі Ері кора являє собою однорідний за густиною, але змінний за товщиною поверхневий шар, що покриває м'який субстрат, в якому протягом тривалого геологічного періоду не підтримуються негідростатичні напруження [5]. Межа поділу цих двох шарів розміщена так, що відображає топографію і задовольняє ізостатичну умову: під підняттям кора опускається в мантію так, що гори утворюють “коріння” товстої кори, а океани залягають над тонкою корою, щоб компенсувати навантаження. Зазвичай цю поверхню поділу ототожнюють з межею Мохо, але є непоодинокі дані про значні латеральні структурні зміни нижче від цієї межі і відповідно глибина компенсації в цих випадках може не збігатися з названою межею. Припущення про постійну густину маси в корі також не є достатньо аргументованим, оскільки аналогічні глибини компенсації і гравітаційні аномалії отримують в тому разі, коли густина кори зростає з глибиною або якщо кора є шаруватою та не стиснутою і зміщення породи в ній відбувається тільки у вертикальному напрямі.

У моделі Пратта [5, 6] топографічна поверхня підстилається шаром однакової товщини (відносно рівня моря), але змінної густини, так, що тиск на рівні нижньої основи цього шару залишається постійним. Тоді високо припідняті області підстилаються матеріалом з меншою густиною, а низинні області – масами з більшою густиною. Часто за таку компенсаційну глибину приймають підшву літосфери, оскільки латеральні варіації густини не можуть статично зберігатися нижче за цю глибину. У цій моделі припускають, що гори є наслідком вертикального розширення, хоча в більшості горотворних процесів саме сили стиснення відіграють найважливішу роль. Крім того,

залишається незрозумілим, чому саме основа літосфери приймається за поверхню компенсації, оскільки реологічні закономірності свідчать про те, що нижня частина літосфери не зможе зберігати значні горизонтальні напруження протягом геологічного часу.

Отже, ці класичні уявлення про ізостазію відображають ідеалізовані моделі, оскільки вертикальні колонки, заповнені масами, урівноважуються незалежно від навколишніх колонок з масами. Подібна ситуація можлива лише за відсутності напружень зсуву (або сколюючих напружень). Але ж фактично ізостатичний стан не є станом строгої механічної рівноваги. Крім того, обидві описані моделі ізостазії визначають локальні моделі компенсації. Їх недолік полягає в тому, що вони не дають правильного пояснення динамічного стану кори під дією поверхневих навантажень, оскільки очевидно, що будь-яке мале поверхнєве навантаження повинно викликати вертикальні рухи для встановлення компенсації і, отже, ізостатичної рівноваги. Ці моделі не охоплюють неоднорідні маси в тілі кори і не враховують можливі інші способи компенсації в різних районах Землі. У результаті отримуваних ізостатичних аномалій переважно відображають не порушення ізостазії, а неоднорідності густини маси у верхній частині геологічного розрізу, які зумовлені відмінностями товщини і густини осадових відкладень. Тому жодна з моделей ізостазії не відповідає реальності, а реальна модель, що характеризує який-небудь регіон Землі, буде значно складнішою й охоплюватиме обидва аспекти: гірські системи, під якими розташовано “коріння”, і латеральні зміни густини. Крім того, жодна з модифікацій цих моделей (наприклад, моделі Пратта–Хейфорда або Ері–Хейсканена) не поліпшують результати інтерпретації гравітаційного поля, коли йдеться про фізичні аспекти проблеми. Однак у більшості дискусій на тему ізостазії напруженим станом в корі чи літосфері ігнорують (винятком є сучасні дослідження Артюшкова [6]). Проте ще Джеффрис [7] стан ізостатичної рівноваги пояснював певним розподілом густини мас, що мінімізує різницю максимальних напружень в якому-небудь місці плаваючого шару, нижче від якого досягається стан гідростатичної рівноваги. Отже, області недокомпенсації або перекомпенсації, які були виявлені на Землі, можна було би інтерпре-

тувати як наслідок того, що земна кора може зберігати деякі негідростатичні напруження протягом тривалого часу і що поверхневі деформації можуть підтримуватись горизонтальними силами в корі і верхній мантії.

У зв'язку з цим виникла необхідність побудови таких моделей, які враховували б регіональну компенсацію поверхневого навантаження. У цьому випадку однією з найпростіших механічних моделей є уявлення про літосферу як про тонку пружну пластину, яка розміщена на рідкому субстраті. Вперше таку модель регіональної компенсації запропонував Венінг–Мейнес в 1931 р. [6]. Ідею регіональної компенсації підтримали інші дослідники, які замість тонкої пластини розглядали пружний шар скінченної товщини, у великомасштабному наближенні при вирішенні питання про ізостатичну рівновагу принципів відмінностей в моделях тонкої пластини і пружного шару немає.

Виконавши огляд літератури з проблеми ізостазії, а також беручи до уваги дослідження, виконані Джефферісом, автори [8] приходять до висновку, що ізостазія є природним станом еволюції механічної системи як реакція на прикладене поле напружень. Вона близька до мінімального стану напруження, яке може бути досягнуте внаслідок дії гравітаційних сил на певну конфігурацію топографічних висот, оскільки будь-яка механічна система завжди прагне відреагувати так, щоб мінімізувати напруження. Ще один висновок випливає з того, що ендегенний тепловий процес в надрах планети (за достатньо високих температур) не підтримуватиме сколюючі напруження, а за відсутності всіх інших сил, окрім виштовхувальних, просторовий розподіл внутрішніх мас буде наближатись до ізостатичного стану. Отже, можна стверджувати, що ізостазія відображає певний аналог дії термомеханічної системи в процесі еволюції планети.

На підтвердження останнього припущення розглянемо показовий приклад ізостатичної компенсації океанічної літосфери Землі. Для опису механізму компенсації в океанічній літосфері найкраще підходить модель термічної ізостазії [8]. Як відомо, океанічна літосфера утворюється на серединно-океанічному хребті із гарячих мантіїних порід. Внаслідок перенесення тепла до поверхні відбувається охоло-

дження і потовщення літосфери. Охолоджуючись, літосфера стає щільнішою і в результаті теплового стиснення її поверхня опускається. Цей тип компенсації стиснутої породи літосфери з аномальною густиною, яка виникла внаслідок опускання поверхні літосфери, цілком природно називати термічною ізостазією.

Останнім часом під час регіональних та планетарних досліджень в інтерпретації гравітаційного поля Землі здійснено спроби (як виявилось пізніше, цілком виправдані) створення в деякому смислі узагальнених і технологічних моделей ізостазії, які ґрунтуються на статистичному підході в опрацюванні даних вимірювань аномалій сили ваги та висот топографічної поверхні. У роботі Л. Дормана і Б. Льюїса [9] започатковано новий напрям у вивченні ізостазії, так звану “експериментальну ізостазію”, або метод крос-спектрального аналізу даних (метод передавальних функцій – ПФ).

Передбачається, що аномалія сили ваги в редукації Буге  $\Delta g_B$  в точці  $r_0$  пов'язана з висотою рельєфу  $h$  в точці  $r$  співвідношенням

$$\Delta g_B(r_0) = \int_s f(|r_0 - r|)h(r)ds + g, \quad (2)$$

де  $r$  – поточна координата на площині  $s$ ;  $f$  – невідома вагова функція, яка залежить від відстані між точками;  $g$  – складова в  $\Delta g_B$  неізостатичної природи (шумова компонента).

Застосувавши перетворення Фур'є, вираз (4.2) можна подати в спектральній формі:

$$\Delta G_B(k) = F(k)H(k) + \tilde{G}(k), \quad (3)$$

де  $\Delta G_B, H, \tilde{G}$  – двовимірні перетворення Фур'є від аномалії сили ваги в редукації Буге, топографії і шуму;  $k$  – хвильове число.

Функція  $F(k)$ , яка названа передавальною, або адмітансом, залежить від розподілу аномальної густини мас, що забезпечують компенсацію одиничного елемента поверхневого навантаження, тобто відображає “ізостатичну реакцію” на поверхневе навантаження і, отже, залежить від моделі ізостатичної компенсації.

Зазначимо, що метод адмітансу виник в статистичній теорії зв'язку й автоматичного регулювання. Оптимальна оцінка за способом найменших квадратів має вигляд

$$\tilde{F}(k) = \frac{\langle \Delta G_B(k) H^*(k) \rangle}{\langle H(k) H^*(k) \rangle}. \quad (4)$$

У формулі зірочка означає комплексне сполучення, кутові дужки – усереднення по всій досліджуваній поверхні.

Отже, визначивши  $\tilde{F}(k)$  з обчислювального експерименту на підставі даних вимірювань аномалій сили ваги в редукції Буге  $\Delta g_B$  та висот поверхні  $h$ , можна зробити певні висновки про механізм ізостатичної компенсації структур досліджуваного регіону. Так, Л. Дорман і Б. Льюїс [9] встановили, що для континентальної частини Америки оптимальною є лінійна модель залежності аномалій сили ваги в редукції Буге від висоти.

Обернене перетворення функції  $\tilde{F}(k)$  “ізостатичної реакції” для визначення аномальних мас підстиляючого шару не є однозначним, тому автори [9] зауважили, що компенсація є локальною, тобто аномальна густина розподілена безпосередньо під поверхневим точковим навантаженням. Більш того, вибрана модель допускає інверсію (коливальні варіації) густини залежно від глибини за схемою, в якій області підвищеного рельєфу спочатку підстиляються від'ємною аномалією густини, а потім додатною аномалією на більшій глибині. Ці аномалії простежуються вниз до значної глибини (приблизно 400–500 км), а коливальні зміни густини відповідають аналогічному режиму, встановленому в результаті інверсії часових аномалій пробігу сейсмічних хвиль [6]. Зауважимо, що тривимірні моделі розподілу густини надр планети, запропоновані в [10], допускають також коливальну зміну аномалій густини мас (інверсію густини) з глибиною.

Отже, результати досліджень, виконаних Л. Дорманом і Б. Льюїсом [9] та іншими авторами [1, 11] є цілком обґрунтованими в тому сенсі, що вони дають змогу розглядати ізостацію на базі фізично можливих моделей. На жаль, невизначеність функції “ізостатичної реакції” залишається істотним недоліком, який

впливає на подальше удосконалення моделей ізостації на основі використання крос-спектрального аналізу даних. Це зумовлено переважно наявністю шумової компоненти  $g$  у виразі (2), яка, ймовірно, включає аномальні варіації густини в корі і мантії, що не корелюють з топографією. Однак така модель є найпростішою та технологічною моделлю ізостації і може бути корисною для оцінки внеску топографії і кори в планетарне гравітаційне поле планети.

### Висновок

Отже, проблеми ізостації та інтерпретація гравітаційних аномалій планет є доволі складними та неоднозначними. Ця обставина свідчить про необхідність аналізу гравітаційного поля і топографії планет з єдиних планетологічних позицій, що дає можливість встановити в планетарному масштабі не тільки їх загальні закономірності, але і глибше зрозуміти характер і спрямованість тих динамічних процесів, які сформували сучасну їх тектонічну структуру.

### Література

1. Коган М.Г. Кросс-спектральный метод исследования изостазии океанических и континентальных структур / М.Г. Коган, Е.И. Магницкая, Н.И. Чернова // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1987. – № 11. – С. 71–84.
2. Лунев Б.В. Изостазия как динамическое равновесие вязкой жидкости / Б.В. Лунев // Докл. АН СССР. – 1986. – Т. 290, № 1. – С. 72–76.
3. Тараканов Ю.А. Интерпретация крупномасштабных гравитационных аномалий Земли / Ю.А. Тараканов, Т.Н. Черевко // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1979. – № 4. – С. 25–42.
4. Церклевич А.Л. О некоторых методах построения модели изостазии // Изучение Земли как планеты методами геофизики, геодезии и астрономии / А.Л. Церклевич, Ю.П. Дейнека. – К.: Наукова думка, 1994 – С. 178–183.
5. Мещеряков Г.А. Гравитационное поле, фигура и внутреннее строение Марса / Г.А. Мещеряков, А.Л. Церклевич. – К.: Наукова думка, 1987. – 240 с.
6. Артюшков Е.В. Геодинамика / Е.В. Артюшков – М.: Наука, 1979. – 327 с.
7. Джефрис Г. Земля, ее происхождение, история и строение / Г. Джефрис – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 484 с.

8. Phillips R.J. Gravity fields of the terrestrial planets: Long-wavelength K. Lambeck. // *Rev. Geophys.* –1980. – 18, №1. – P. 27–76.

9. Anomalies and tectonics / R.J. Phillips, Dorman L.M. Experimental isostasy, 1, Theory of the determination of the earth's isostatic response to a concentrated load / L.M. Dorman, B.T.R. Lewis // *J. Geophys. Res.* – 1970. –75. – P. 3357–3365.

10. Церклевич А.Л. Інтерпретація планетарних аномалій гравітаційного поля Марса / А.Л. Церклевич, О.С. Заяць // Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК “Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва”. – Львів, 2008. – С. 97–108.

11. Церклевич А.Л. Сучасні вертикальні рухи земної кори та їх зв'язок з геофізичними полями / А.Л. Церклевич, Ю.П. Дейнека // *Геодинаміка.* – 1998. – № 1. – С. 145–152.

#### **Ізостазія та ізостатичні моделі**

А. Церклевич

Проаналізовано моделі ізостазії та розглянуто інтерпретацію ізостатичного стану планет.

#### **Изостазия и изостатические модели**

А. Церклевич

Проанализированы модели изостазии и рассмотрена интерпретация изостатического состояния планет.

#### **Isostasy and isostatic models**

A. Tserklevych

Isostasy analysis and interpretation of the isostatic state on planets.

## **XXIV МІЖНАРОДНИЙ КОНГРЕС FIG**

**відбудеться**

**11–16 квітня 2010 р., м. Сідней**

Інформацію можна отримати за адресою:

<http://www.isaust.org.ua//>

**Організоване FIG засідання  
науковців-геофізиків всього світу**

**відбудеться**

**2–7 травня 2010 р., м. Відень, Австрія**

Інформацію можна отримати за адресою:

[www.fig2010.com](http://www.fig2010.com), телефон +43-1-58804-197