

Результати довгострокових нахиломірних спостережень у соляній шахті м. Соледар (можливий резонансний ефект рідкого ядра Землі)

© А. М. Кутний, В. Г. Павлик, В. Г. Булацен, Т. М. Бабич, 2011

Полтавська гравіметрична обсерваторія ІГФ НАН України, Полтава, Україна

Надійшла 14 грудня 2010 р.

Представлено членом редколегії В. І. Старостенко

В результате переобработки продолжительных (около 2600 сут) высокоточных наклонных наблюдений на глубоководной станции г. Соледар (Донецкая обл.), расположенной в соляной шахте на глубине 120 м, по методике исключения дрейфа способом "нулевых точек" и влияния метеорологических возмущений путем моделирования впервые определены разности амплитудных факторов суточных приливных волн $\gamma_{O1} - \gamma_{K1}$ и $\gamma_{O1} - \gamma_{P1}$ с точностью не хуже 1,8 и 4,2 % соответственно, которые генерируются резонансным эффектом жидкого ядра Земли и играют важную роль при построении и выборе наиболее достоверной модели внутреннего строения Земли. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими расчетами Джеффриса и Висенте для их второй модели Земли.

As a result of processing of long-term (about 2600 days) highly accurate tilt observations on a mid-continent Soledar station (Donetsk region), situated in a salt mine at a depth of 120 m, by the procedure of elimination of drift by "null points" the amplitude factors differences of diurnal tidal waves $\gamma_{O1} - \gamma_{K1}$ and $\gamma_{O1} - \gamma_{P1}$ have been calculated for the first time with an accuracy of not worse than 1,8 and 4,2 % respectively. The differences are generated by the Earth's liquid core resonance effect and play a key role in constructing and selecting the most plausible model of the internal structure of the Earth. The results obtained correlate well with Jeffreys and Vicente theoretical calculations for their second model of the Earth.

Форма та внутрішня будова Землі впливають на її рух та положення у просторі. Якщо ядро Землі рідке та сплюснуте, то у її осі, а відтак й оболонці, крім чандлерівського руху має бути ще одна вільна нутація з періодом, дуже близьким до зоряної доби. На це вперше вказано у статтях [Слудский, 1895; Nouph, 1896; Poincare, 1910], але через відсутність на той час достовірних даних щодо внутрішньої будови Землі, розміру та стиснення ядра дослідникам не вдалось точно визначити заданий добовий період. За умов, коли сили тяжіння інших небесних тіл відсутні, добовий нутаційний рух

земної оболонки залежить від гравітаційної взаємодії і гідростатичного тиску на межі ядра та оболонки. Тільки у випадку її сферичної форми та відсутності тертя на межі розподілу ядро не впливає на оболонку. Під дією приливних сил Сонця і Місяця в тілі Землі виникають періодичні зміщення мас, що приводить до появи вимушених нутаційних коливань її малої осі інерції. Якщо період приливних коливань близький до періоду власних коливань T_0 , то виникає явище резонансу, коли амплітуди приливних хвиль з частотами, близькими до резонансної частоти T_0 , помітно змінюються.

На основі сейсмічних даних, які істотно обмежили гіпотези про будову та розміри ядра, розподіл мас і пружних властивостей оболонки Землі, Г. Джеффріс і Р. Вісенте [Jeffreys, Vicente, 1957] вперше створили об'єднану теорію припливів і нутації Землі для двох спрощених моделей будови ядра та її оболонки. Пізніше [Молоденский, 1961] була розроблена уточнена теорія нутації і добових припливів з урахуванням нових даних щодо розподілу мас, густини, сил Коріоліса та інерції Землі. Для двох імовірних моделей будови Землі з рідким ядром (МІ і МІІ) уперше отримано точні значення періоду T_0 добової нутації оболонки Землі: $23^{\text{h}} 53^{\text{m}} 00^{\text{s}}$ і $23^{\text{h}} 52^{\text{m}} 58^{\text{s}}$ відповідно. Слід зауважити, що ці теорії допускають тільки радіально неоднорідну і майже ідеально пружну оболонку з неоднорідним ідеально рідким ядром, яке може стискатись і динамічний ефект якого враховують лише для добових хвиль.

У 1970-х роках з'явилися практично рівноцінні теорії [Sasao et al., 1977; Wahr, Sasao, 1981], в яких на той час були враховані дані щодо стану та межі в'язкості рідкого ядра, радіального і горизонтального характеру розподілу густини, модулів пружності та параметрів добротності оболонки, а також впливу океанічного припливу і дисипаційної припливної енергії океанів на вільну і вимушену нутацію Землі.

Комплексний аналіз експериментальних сейсмічних, геофізичних, астрономічних та радіоінтерферометричних спостережень [Gwinn et al., 1986; Wahr, Bergen, 1986] виявив відмінності амплітуд нутації, отриманих із спостережень, від їх теоретичних значень, які неможливо пояснити ні пружністю мантії, ні врахованими в теорії ефектами неоднорідності й стищення земного ядра. Тому питання отримання та інтерпретації нових високоточних даних щодо нутації Землі є актуальним і становить значний науковий інтерес.

Спроби виявити добовий період вільної нутації Землі із астрономічних спостережень за зміною широти не дали задовільних результатів у зв'язку з їх низькою точністю, епізодичністю, нерегулярністю і значним впливом збурювальних метеорологічних чинників. Лише із задовільною точністю параметри вимушеної добової нутації Землі отримані з довгострокових рядів астрономічних спостережень за зміною широти яскравих зенітних зірок у Полтаві [Роров, 1963].

На сьогодні одним із результативних і необхідних для удосконалення моделей внутрішньої будови і фізичних властивостей Землі є

дослідження вільної добової нутації Землі на основі високоточних, довгострокових і неперервних земноприпливних спостережень за зміною сили тяжіння як за величиною, так і за напрямком, оскільки саме припливні дані досить чітко реагують на горизонтальні неоднорідності кори і мантії.

Із гравіметричних та нахиломірних спостережень отримують так звані амплітудні фактори δ і γ , що являють собою відношення амплітуд припливної хвилі, визначеної зі спостережень, до її теоретичного аналогу, обчисленого за умови абсолютно твердої непіддатливої припливним силам Землі. Ці фактори є лінійними функціями коефіцієнтів Лява h і k , що характеризують пружні властивості та внутрішню будову Землі, але за наявності рідкого ядра та впливу зовнішніх гравітаційних сил вони не є сталими для всіх припливних хвиль. Згідно з теорією [Молоденский, 1953], амплітуди припливних хвиль з періодами, близькими до періоду вільної добової нутації T_0 , змінюватимуться внаслідок резонансу. Оскільки цей резонанс досить гострий, то зміни виявлятимуться лише у амплітудних факторах добових припливних хвиль K_1 , P_1 , ϕ_1 , ψ_1 . Ці хвилі мають дуже малі амплітуди; серед них найбільшою є амплітуда хвилі K_1 , і стосовно неї амплітуди хвиль P_1 , ϕ_1 , ψ_1 менші у 3, 5 і 100 разів відповідно. Із добових хвиль головна добова хвиля O_1 місячного походження не реагує на резонансний ефект рідкого ядра Землі та має зіставну із хвилею K_1 амплітуду.

За розрахунками [Молоденский, 1961], для припливних спостережень за зміною напрямку сили тяжіння різниця між амплітудними факторами γ хвиль O_1 і K_1 ($\gamma_{O_1} - \gamma_{K_1}$) для двох найімовірніших моделей Землі МІ і МІІ із рідким ядром становить $(-0,044)$ і $(-0,040)$ відповідно. Це приблизно дорівнює 6 % величини γ_{O_1} . Для припливних варіацій сили тяжіння різниця $\delta_{O_1} - \delta_{K_1}$ для досліджуваних моделей становить $(+0,023)$ і $(+0,021)$ відповідно. Як видно, це дуже малі величини і визначати їх потрібно з точністю не гірше 10 %. Важкість виділення хвиль O_1 і K_1 полягає у тому, що вони сильно збурюються цілим рядом неприпливних квазіперіодичних добових факторів метеорологічного походження з близькими частотами. Що стосується дуже малих хвиль ϕ_1 і ψ_1 , то метеорологічні збурення практично унеможливають їх виділення на сучасному етапі земноприпливних досліджень. Відомо, що вплив цих метеорологічних чинників зменшується із збільшенням глибини пунктів спо-

Результати виявлення впливу рідкого ядра Землі із нахиломірних спостережень у соляній шахті м. Соледаар і теоретичні розрахунки

Номер пункту і поста-мента спостережень	Період спостережень	Ряд гармонічного аналізу	Кількість рядів	Результати спостережень (напрямок схід—захід)			Модель будови Землі		
				($\gamma_{01} - \gamma_{k1}$) [*]	$\gamma_{01} - \gamma_{k1}$	$\gamma_{01} - \gamma_{p1}$	Літературне джерело	$\gamma_{01} - \gamma_{k1}$	$\gamma_{01} - \gamma_{p1}$
1	26.03.1967— 04.01.1969	Річний Місячний	2 20	—	$-0,0462 \pm 0,0021$	$-0,0400 \pm 0,0052$	[Jeffreys, Vicente, 1957]		
				$-0,0427 \pm 0,0117$	—	—			
2	19.02.1971— 28.09.1972	Річний Місячний	2 15	—	$-0,0389 \pm 0,0009$	$-0,0410 \pm 0,0020$	МП МП	$-0,056$	$-0,018$
				$-0,0475 \pm 0,0050$	—	—		$-0,035$	$-0,038$
3	30.12.1973— 22.01.1975 18.03.1975— 16.09.1975 09.10.1975— 29.10.1976	Річний Місячний « «	1 11 6 6	—	$-0,0354 \pm 0,0021$	$-0,0347 \pm 0,0039$	[Молоденский, 1961] МП МП [Wahr, Bergen, 1986] [Gilbert, Dzievonski, 1975] (1066A)		
				$-0,0342 \pm 0,0019$	—	—		$-0,044$	$-0,013$
				$-0,0572 \pm 0,0175$	—	—		$-0,040$	$-0,011$
				$-0,0512 \pm 0,0085$	—	—		$-0,044$	$-0,011$
4	25.09.1975— 04.08.1978	Річний Місячний	2 13	—	$-0,0342 \pm 0,0029$	$-0,0251 \pm 0,0049$	[Dzievonski et al., 1975] (PEM-C)	$-0,030$	$-0,011$
				$-0,0281 \pm 0,0072$	—	—		$-0,042$	$-0,010$
Середнє вагове				$-0,0391 \pm 0,0007$	$-0,0382 \pm 0,0016$		$-0,030$	$-0,011$	

стережень. Тому для визначення резонансного ефекту рідкого ядра Землі спостереження слід виконувати у глибоких шахтах або свердловинах, де вплив метеорологічних чинників може бути незначний. В цьому відношенні доволі придатною є соляна шахта 1 у м. Соледар, що має глибину 120 м. Річний хід температури повітря в ній не перевищує $0,2^{\circ}\text{C}$, а вологості — 10 %. У 1967—1978 рр. у шахті виконували нахиломірні спостереження у чотирьох пунктах за допомогою модернізованих горизонтальних маятників Репсольда — Левицького [Баленко та ін., 1972].

Детальна інформація про умови, методику, апаратуру спостережень та отримані результати подана у статтях [Баленко та ін., 1972, 1974а, б, 1979].

Зауважимо, що головною метою вказаних спостережень було визначення достовірних регіональних параметрів пружного припливу для Дніпровсько-Донецької западини і дослідження впливу на них ефекту порожнини [Harrison, 1976]. Для вирішення цих завдань переважно використовували параметри головної півдобової припливної хвилі M_2 місячного походження, яка має найбільшу амплітуду (близько 7 мс дуги) та практично вільна від впливу метеорологічних чинників добового періоду.

З появою досконалішої методики обробки земноприливних спостережень [Кутний, Бабич, 2010], що забезпечує значне підвищення точності параметрів приливних хвиль з меншою амплітудою, з'явилась реальна можливість визначення впливу резонансного ефекту рідкого ядра Землі на параметри приливних хвиль K_1 і P_1 . Тому весь отриманий експериментальний матеріал у чотирьох пунктах спостережень опрацьовано за допомогою нової вдосконаленої методики як місячними, так і, де це можливо, річними серіями гармонічного аналізу [Venedikov, 1960; Матвеев, 1966, 1970].

Обробка щогодинних місячних рядів нахиломірних спостережень не дає змогу виділити параметри γ хвиль K_1 і P_1 у чистому вигляді, оскільки хвилі мають дуже близькі частоти і їх важко розділити на місячному інтервалі спостережень. При цьому отримують так званий груповий параметр γ^* зазначених хвиль. Якщо

спостереження місячними серіями здійснюють рівномірно протягом року, то за осереднення отриманих значень параметра γ^* вплив хвилі P_1 на K_1 дуже малий, оскільки порівнянно із K_1 ця хвиля має суттєво меншу амплітуду. Середня квадратична помилка визначення таким чином γ_{K_1} буде дещо завищеною.

У таблиці наведено результати різниць амплітудних факторів $\gamma_{O_1} - \gamma_{K_1}$ і $\gamma_{O_1} - \gamma_{P_1}$, їх середні квадратичні помилки для чотирьох пунктів соляної шахти 1 у м. Соледар після опрацювання нахиломірних спостережень як місячними, так і, де це було можливо, річними неперервними щогодинними серіями та їх теоретичні аналоги для найімовірніших моделей будови Землі із рідким ядром. Аналіз отриманих результатів дає змогу дійти таких висновків.

1. У результаті переобробки нахиломірних спостережень, що виконані в соляній шахті 1 м. Соледар на глибині 120 м протягом 1967—1978 рр., за методикою виключення дрейфу способом “нульових точок” і вилучення впливу метеорологічних збурень за моделювання вперше отримано різниці амплітудних факторів добових приливних хвиль $\gamma_{O_1} - \gamma_{K_1}$ і $\gamma_{O_1} - \gamma_{P_1}$ з точністю не гірше 1,8 та 4,2 % відповідно, які є проявом резонансного ефекту рідкого ядра Землі у динаміці її оболонки.

2. Отримані дані не підтверджують наявності гострого резонансного ефекту рідкого ядра Землі, оскільки різниці параметрів $\gamma_{O_1} - \gamma_{K_1}$ і $\gamma_{O_1} - \gamma_{P_1}$ виявились практично однаковими, хоча частоти хвиль K_1 і P_1 суттєво відрізняються.

3. Результати різниць амплітудних параметрів приливних хвиль O_1 , K_1 і P_1 найкраще відповідають другій моделі Джеффріса — Вісенте [Jeffreys, Vicente, 1957] внутрішньої будови Землі. Всі інші достовірні моделі будови Землі характеризуються дуже малою різницею амплітудних факторів $\gamma_{O_1} - \gamma_{P_1}$, яка практично знаходиться у межах помилок сучасних вимірювань і протирічить як отриманим нами результатам, так і аналогічним даним, які одержані в результаті осереднення на восьми найкращих нахиломірних станціях Західної Європи [Melchior, 1966].

Список літератури

Баленко В. Г., Кутний А. М., Новикова А. Н. Наклономерные наблюдения в г. Карло-Либкнехтовске по программе изучения эффекта полос-

ти // Вращение и прилив. деформации Земли. — 1979. — Вып. 11. — С. 9—18.

Баленко В. Г., Кутний А. М., Новикова А. Н., Алек-

- сангров И. М. Наклономерные наблюдения в шахте № 1 рудоуправления "Артемсоль" (камера 2) // Вращение и прилив. деформации Земли. — 1974а. — Вып. 6. — С. 36—42.
- Баленко В.Г., Кутный А.М., Новикова А.Н., Александров И. М. Наклономерные наблюдения в шахте № 1 рудоуправления "Артемсоль" (камера 1) // Вращение и прилив. деформации Земли. — 1972. — Вып. 4 — С. 20—43.
- Баленко В.Г., Овчинников В.А., Кутный А.М., Голубицкий В.Г. Горизонтальный маятник с цельнеровским подвесом на металлических нитях // Вращение и прилив. деформации Земли. — 1974б. — Вып. 6. — С. 3—16.
- Кутный А.М., Бабич Т.М. Підвищення точності визначення резонансного впливу рідкого ядра Землі на земні припливи // Геофиз. журн. — 2010. — 32, № 3. — С. 140—142.
- Матвеев П.С. Гармонический анализ месячной серии наблюдений земных приливов // Земные приливы. — Киев: Наук. думка, 1966. — С. 51—79.
- Матвеев П.С. Разделение суточных волн P_1 , K_1 и S_1 // Вращение и прилив. деформации Земли. — 1970. — Вып. 2. — С. 80—92.
- Мельхиор П. Физика и динамика планет. Ч.2. — Москва: Мир, 1976. — 484 с.
- Моложенский М.С. Упругие приливы, свободная нутация и некоторые вопросы строения Земли // Тр. Геофиз. ин-та АН СССР. — 1953. — № 19 (164). — С. 3—52.
- Моложенский М.С. Теория нутаций и суточных земных приливов // Земные приливы и нутация Земли. — Москва: Изд-во АН СССР, 1961. — С. 3—25.
- Слудский Ф.А. Нутации Земли с жидким ядром // Бюл. О-ва естествоиспытателей. — 1895. — № 2. — С. 17—35.
- Anderson D.I., Hart R.S. An Earth model based on free oscillations and body waves // J. Geophys. Res. — 1976. — 81. — P. 1461—1475.
- Dziewonski A. M., Hales A. L., Lapwood E. R. Parametrically simple Earth models consistent with geophysical data // Phys. Earth Planet. Int. — 1975. — 10. — P. 12—48.
- Gilbert F., Dziewonski A. M. An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra // Phil. Trans. R. Soc. — 1975. — 278A. — P. 187—269.
- Gwinn C.R., Herring T.A., Shapiro I.I. Geodesy by radio interferometry studies of the forced nutation of the Earth. Data analysis // Phil. Trans. R. Soc. — 1986. — 91, № 85. — P. 4745—4754.
- Hough S. The rotation of an elastic spheroid. Philos. — London: Trans. Roy. Soc., 1896. — A. 187. — P. 319—344.
- Harrison J.C. Gravity and topographic effects in tilt and strain measurement // J. Geophys. Res. — 1976. — № 81. — P. 319 — 329.
- Jeffreys H., Visente R. The theory of nutation and the variation of latitude // Mon. Not. Roy. Astr. Soc. — 1957. — 117, № 2. — P. 142—162.
- Melchior P. The Earth tides. — New York: Pergamon Press, 1966. — 458 p.
- Poincare H. Sur la precession des corps deformables // Bull. Astron. — 1910. — 27. — P. 321—356.
- Popov N.A. La determination de la nutation diurne a partir des observation des etoiles brillantes a Poltava // В. I. М. — 1963. — № 34. — P. 1062—1065.
- Sasao T., Okamoto J., Sakai S. Dissipative core-mantle coupling and nutational motion of the Earth // Publ. Astron. Soc. Japan. — 1977. — № 29. — P. 83—105.
- Venedikov A. P. Une méthode pour l'analyse des marées terrestres á partir d'enregistrements de longueur arbitraire // Com. Obs. Roy. Belg. — 1960. — № 250. — Ser. Geophys. — № 71. — P. 463—485.
- Wahr J. M., Sasao T. A. A diurnal resonance in the ocean tide and in the Earth's load response due to the resonant free core nutation // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. — 1981. — 64, № 3. — P. 747—765.
- Wahr J., Bergen Z. The effect of mantle anelasticity on nutation Earth's tides and tides variations in rotation rate // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. — 1986. — № 2. — P. 633—668.