

Моделювання та роздільне виключення збурень земноприпливних спостережень

А. М. Кутний, В. Г. Павлик, Т. М. Бабич, 2013

Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики НАН України, Полтава, Україна
Надійшла 1 червня 2012 р.

Представлено членом редколегії М. І. Орлюком

Предложена методика раздельного исключения линейного и аномально нелинейного дрейфа земноприливных наблюдений для суточных и полусуточных волн. Она существенно (на порядок) увеличивает точность определения параметров малых приливных волн. Это способствует исследованию тонких эффектов динамики Земли, ее физических свойств и внутреннего строения.

The technique of a separate deletion of linear and anomalous nonlinear drift of earth tides observations for diurnal and semi-diurnal waves are presented. It considerably (on the order) increases accuracy of determination of parameters of small tidal waves. It promotes the study of thin effects of dynamics of the Earth, its physical properties and internal structure.

Вступ. Гравітаційний вплив Місяця та Сонця спричиняє неперервні деформації фізичної поверхні Землі та всіх внутрішніх її шарів — земні припливи. За результатами теоретичних й експериментальних досліджень цього явища отримують уявлення про фізичні властивості та внутрішню будову Землі. Припливоутворювальний потенціал складається із сотень півдобових, добових і довгоперіодичних гармонік (хвиль), що мають суттєво різні, але стабільні у часі параметри (амплітуду, частоту). Найінформативнішими у геофізичному відношенні є добові хвилі O_1 і K_1 , за різницею амплітудних факторів яких можна виявити резонансний ефект рідкого ядра Землі, та півдобові хвилі M_2 і N_2 , що дають можливість визначати числа Лява h і k [Melhiog, 1983].

В реальних умовах земноприпливні спостереження виконують у верхніх шарах земної кори, де припливна динаміка земної поверхні пов'язана з метеорологічними факторами. Основними із них є добові та півдобові нерегулярні зміни температури і вологості верхнього шару ґрунту земної поверхні, а також атмосферного тиску. Ці фактори генерують гідротермічні деформації земної поверхні, що, у свою чергу, зумовлює інструментальний дрейф з частотами, близькими до припливних, і викликають збурення параметрів припливних гармонік. Внесок атмосфери у змінення припливних частот незначний, але повільні й нерегулярні зміни її тиску можуть

суттєво впливати на дрейф геофізичної апаратури і, як наслідок, на результати спостережень. Донині вплив цих екзогенних збурень послаблювали, виконуючи довгострокові земноприпливні спостереження та застосовуючи методи сумісного гармонічного аналізу для визначення параметрів добових і півдобових хвиль із зняттям лінійного дрейфу на досить довгих інтервалах спостережень. При цьому точність отримання параметрів головних хвиль O_1 і K_1 не перевищує 5—10 %, а найбільшій припливної хвилі M_2 — 1,5—2 %, що є перешкодою для подальшого дослідження фізичних властивостей тонких структур внутрішньої будови Землі.

Спираючись на отримані нами результати моделювання гідротермічного впливу на параметри основних припливних гармонік, пропонуємо методику роздільного виключення добових і півдобових метеорологічних збурень параметрів припливних хвиль і зняття як лінійного, так і нелінійного дрейфу на коротких інтервалах спостережень. Ця методика суттєво (на порядок) підвищує точність визначення параметрів припливних хвиль і збільшує інформативність раніше виконаних земноприпливних спостережень.

Результати моделювання та їх інтерпретація. Аналіз результатів переобробки земноприпливних спостережень на деяких нахиломірних пунктах профілів Київ—Артемівськ [Баленко, 1980] та Суми—Херсон [Матвеев,

Богдан, 1970] з використанням методики зняття лінійного дрейфу способом «нульових точок» [Chojnicki, 1973] та методики мінімізації аномальних збурень параметрів припливних хвиль [Кутний, Бабич, 2010] показав, що виключення дрейфу з використанням «нульових точок» добре зарекомендувало себе в умовах, коли регулярні добові метеорологічні збурення припливної кривої не перевищують амплітуди хвилі K_1 більше ніж на 50 %. При цьому значно зменшуються помилки параметрів припливних хвиль O_1 і K_1 , а відтак виникає реальна можливість визначення резонансного ефекту внутрішнього ядра Землі. За перевищення вказаного рівня збурень знижується точність визначення параметрів добових хвиль O_1 і K_1 і починає проявлятися негативний вплив залишків нелінійних аномальних збурень на параметри півдобових припливних хвиль, які також несуть важливу геофізичну інформацію про внутрішній стан та будову Землі. Тому необхідно детальніше дослідження впливу збурювальних факторів на параметри добових і півдобових припливних хвиль і вдосконалення методики їх виключення чи ослаблення.

Для моделювання скористаємось імовірною припливною кривою, обчисленою для нахиломірної станції «Катеринівка» [Баленко и др., 1972] за програмою, що аналогічна програмі Крамер [Крамер, 1962] з урахуванням найдостовірніших параметрів хвилі M_2 для всіх інших припливних хвиль, крім хвилі K_1 , яка через резонансний ефект рідкого ядра Землі [Melhiog, 1983] має дещо збільшений амплітудний фактор γ . Результати гармонічного аналізу для основних припливних хвиль сформованої таким чином місячної серії щогодинних ординат за методом Венедікова [Venedicov, 1966] представлені у першому рядку (див. таблицю). Як видно, за відсутності збурень, використовуючи метод гармонічного аналізу Венедікова на місячній серії нахиломірних даних, можна виділити параметри основних припливних хвиль з точністю не гірше $\pm 0,1$ %, за винятком хвилі N_2 , амплітуда якої вп'ятеро менша порівняно з амплітудою найбільшої припливної хвилі M_2 , і тому точність її визначення становить $\pm 0,5$ %.

У другому рядку таблиці наведено результати гармонічного аналізу, якщо до ймовірної припливної кривої додано змодельовані гармонічні збурення з амплітудою приблизно $\text{б} M_2$ і добовим періодом. Згідно з отриманими при цьому параметрами припливних хвиль, ці

збурення найбільший внесок роблять у хвилю K_1 , оскільки її частота дуже близька до частоти добової змодельованої збурювальної хвилі. Параметри хвилі O_1 визначено значно краще, але їх помилки, як і аналогічні помилки хвилі K_1 , сягають ± 20 % порівняно з імовірними значеннями цих величин. Параметри півдобових хвиль при цьому практично залишилися без змін.

Третій рядок таблиці містить результати гармонічного аналізу після того, як із цієї сумарної змодельованої припливної кривої знято дрейф методом «нульових точок». Виявилося, що внесок аномальних гармонічних збурень при цьому майже удвічі зменшився для хвилі K_1 , але у стільки ж разів збільшився для хвилі O_1 . Амплітуди півдобових хвиль N_2 , M_2 і S_2 збільшилися у середньому на 20 %, а помилки їх визначення — майже в 50 разів стосовно аналогічних даних, що наведені у другому рядку таблиці.

У четвертому рядку таблиці наведено результати гармонічного аналізу місячної ймовірної припливної кривої, до якої додано реальну криву збурень нахилів земної поверхні, що отримана в напрямку E—W на ст. «Березова Рудка» [Баленко и др., 1978] у літній період у результаті вилучення ймовірної припливної кривої для цієї станції від фактично зареєстрованої сумарної кривої щогодинних нахилів земної поверхні.

Як видно, реальні аномальні збурення значно вплинули на параметри добової хвилі K_1 і півдобової хвилі S_2 . Добова хвиля O_1 , а також півдобові N_2 і M_2 виділилися з великими помилками. Так, для найбільшої припливної хвилі M_2 помилка амплітудного фактора γ становить трохи більше 10 %. На відміну від змодельованих гармонічних збурень (див. другий рядок таблиці), де фактор γ для хвилі M_2 практично не викривлений, маємо його систематичне збільшення приблизно на 10 %. Ще більший вплив реальних аномальних збурень відобразився на параметрах хвиль N_2 і S_2 .

У п'ятому рядку подано параметри п'яти найбільших припливних хвиль після зняття лінійного дрейфу методом «нульових точок». Як видно, амплітуда хвилі K_1 суттєво (більше ніж утричі) зменшилась і прямує до її нормального значення. Амплітуда хвилі O_1 також зменшилась удвічі, але помітно відрізняється від її достовірної величини. Помилка визначення параметрів цих хвиль зменшилась, але несуттєво, приблизно на 50 % стосовно аналогічних даних, що наведені у четвертому рядку.

Результати дослідження впливу аномальних збурень на параметри основних припливних хвиль (нахиломірна ст. «Катеринівка», напрямок E—W)

№ п/п	Варіант гармонічного аналізу	O_1 ($R_T = 6,55$)		K_1 ($R_T = 9,22$)		N_2 ($R_T = 3,02$)		M_2 ($R_T = 15,79$)		S_2 ($R_T = 7,35$)	
		γ	$\Delta\phi^0$	γ	$\Delta\phi^0$	γ	$\Delta\phi^0$	γ	$\Delta\phi^0$	γ	$\Delta\phi^0$
1	Імовірна припливна крива без збурень	0,7015±0,0007	0,00±0,05	0,7381±0,0005	0,06±0,04	0,6962±0,0034	0,26±0,28	0,7008±0,0005	0,06±0,04	0,6972±0,0010	0,13±0,08
2	Добавлено змодельовані гармонічні збурення	0,5107±0,1523	3,93±17,12	4,0300±0,1245	5,68±1,74	0,6945±0,0034	-0,32±0,28	0,7002±0,0005	0,07±0,04	0,6965±0,0010	0,12±0,08
3	Виключення лінійного Арейфу методом «нульових точок»	1,2901±0,1503	16,38±6,68	1,9201±0,1229	-1,73±3,60	1,0592±0,1569	-3,89±8,48	0,8334±0,0242	0,40±1,66	0,7833±0,0442	-7,42±3,27
4	Добавлено імовірну криву збурень	0,7866±0,4217	-37,04±30,73	7,7199±0,3392	70,11±2,55	0,2810±0,4961	-88,73±101,31	0,7656±0,0767	3,08±5,74	1,8242±0,1400	17,28±4,44
5	Виключення лінійного Арейфу методом «нульових точок»	0,3046±0,3152	-72,01±59,20	2,0673±0,2544	53,58±7,09	1,0211±0,6387	-40,69±35,83	0,9636±0,0986	-8,07±5,87	1,5049±0,1799	1,81±6,93
6	Роздільне виключення гармонічних збурень	0,7758±0,0061	0,40±0,45	0,8687±0,0049	0,60±0,32	0,6907±0,0186	0,17±1,54	0,7110±0,0029	0,06±0,23	0,7035±0,0052	0,18±0,43
7	Роздільне виключення ймовірних збурень	0,7007±0,0198	1,22±1,62	0,7802±0,0162	8,65±1,17	0,6741±0,0546	1,27±4,63	0,7105±0,0084	0,04±0,68	0,7744±0,0154	2,09±1,15

Примітка: R_T — теоретичні амплітуди припливних хвиль, мс дути.

Амплітуди півдобових хвиль M_2 і N_2 при цьому збільшилися на 50 %, а хвилі S_2 — майже на 100 %. Помилки їх визначень практично залишилися без змін порівняно з аналогічними даними четвертого рядка.

Таким чином, виконані дослідження свідчать, що аномальні добові збурення, амплітуда яких на частоті хвилі K_1 перевищує 50 % її імовірного значення, ще досить добре виключаються за вилучення лінійного дрейфу методом «нульових точок», але можуть суттєво впливати на параметри півдобових головних припливних хвиль. У зв'язку з цим слід здійснювати роздільне виключення аномальних збурювальних факторів із параметрів добових і півдобових земноприпливних хвиль. Пропонуємо таку методику розв'язання цієї задачі.

До вихідного ряду щогодинних фактичних ординат Y_c , які отримані зі спостережень, де крім припливу зареєстровані як добові, так і півдобові збурення, а також лінійний і нелінійний дрейф, застосовуємо комбінацію [Дубик, 1981], що виділяє добовий приплив з точністю не гірше 0,1 %:

$$Y_{6,5} \left(Y_4 - \frac{Y_0}{2} \right) Z_1 Z_{0,5},$$

де $Y_k = 2 \cos kq$; $Z_k = 2 \sin kq$; q — кутова швидкість поширення добової припливної хвилі.

Комбінацію перевірено на теоретичній нахиломірній припливній кривій, для хвиль O_1 та K_1 множник її вибіркості становить $4,065 \pm 0,005$. Це означає, що після застосування згаданої комбінації амплітуди хвиль O_1 та K_1 збільшаться; для зведення їх до нормального стану добову припливну криву Y_{c0}^* потрібно зменшити на цей множник вибіркості і, отже, отримати криву фактичних добових ординат Y_{c0} . Віднявши від щогодинних ординат Y_c відповідні щогодинні ординати Y_{c0} , матимемо ряд півдобових фактичних ординат Y_{cnd} . Далі кожен із отриманих рядів очищаємо від лінійного дрейфу методом «нульових точок». При цьому частина збурень як добового, так і півдобового характеру буде виключена, а добові збурення жодним чином уже не вплинуть на параметри півдобових хвиль, оскільки вони у Y_{cnd} відсутні. Позначимо отримані ряди відповідно Y_{c0} і Y_{cnd} . Крім припливної частини ці ряди містять залишки нелінійного дрейфу, які неоднакові на різних інтервалах між «нульовими точками».

Не маючи додаткових даних та надійного

механізму їх впливу на припливну криву, неможливо з високою точністю виключити ці збурення, але значно ослабити їх аномальну дію на параметри припливних хвиль цілком можливо. Зробимо це у такий спосіб. Віднімемо від добової кривої Y_{c0} та півдобової припливної кривої Y_{cnd} відповідні ймовірні припливні криві Y_{i0} та Y_{ind} , які вираховані з найбільш точними даними параметрів, що отримані як середні з усього матеріалу спостережень для самої великої припливної хвилі M_2 , яка, як відомо, слабо реагує на збурювальні фактори.

Таким чином, маємо ряди добових і півдобових залишків

$$\Delta Y_{c0} = \bar{Y}_{c0} - Y_{i0},$$

$$\Delta Y_{nd} = \bar{Y}_{cnd} - Y_{ind}.$$

Ці залишки складаються із незначної (у межах $\pm 2\%$) частини невиключеного припливу та впливу нелінійних збурювальних факторів. Вважатимемо, що допустимі нелінійні аномальні збурення є такими, що не перевищують подвійну суму випадкової середньої квадратичної помилки σ_Y ординати Y_c , яку отримано із спостережень, та середньої квадратичної помилки σ_n визначення постійних інструментальних параметрів, яка має систематичний вплив:

$$\sigma_{con} = \Delta Y_{con} = 2(\sigma_Y + \sigma_n).$$

Середню квадратичну помилку σ_Y фактичних ординат визначимо, скориставшись формулою [Мельхіор, 1968]:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_1^n e_n^2}}{\sqrt{n \sum_1^p m_p^2}},$$

де e_1, e_2, \dots, e_m — результат застосування n раз комбінації $Z_{0,5} Z_{0,5} (Y_2 - Y_0/2)$ [Дубик, 1981] до рядів Y_{c0} та Y_{cnd} . Ця комбінація виключає дрейф і приплив з точністю до 2 % та характеризується такими коефіцієнтами: $-1, 2, 0, -2, 0, 2, -1$, а $\sum_1^7 m^2 = 14$. Застосувавши комбінацію до рядів Y_{c0} та Y_{cnd} із зсувом на одну ординату n раз, матимемо

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_{n-6}^2}{n \cdot 14}}.$$

Середня квадратична помилка σ_n постій-

них інструментальних величин, як показано у [Багмет, Кутный, 1973; Дычко, Корба, 1973], не перевищує 0,3 % шуканих параметрів припливних хвиль або 0,3 % від $Y_{c\hat{d}}$ чи $Y_{cn\hat{d}}$.

На кожному інтервалі між нульовими точками знаходимо середні значення $|\overline{\Delta Y_{\hat{d}}}|$ та $|\overline{\Delta Y_{c\hat{d}}}|$, а розділивши їх на $|\Delta Y_{\hat{d}on}|$, отримаємо так звані коефіцієнти пропорційності $K_{\hat{d}}$ та $K_{n\hat{d}}$ для добових та півдобових інтервалів відповідно. Якщо ці коефіцієнти виявилися меншими за одиницю або дорівнюють їй, то такі інтервали з $\Delta Y_{\hat{d}}$ та $\Delta Y_{n\hat{d}}$ за умовою допустимого рівня збурень $\Delta Y_{\hat{d}on}$ не підлягають виправленню. На інших інтервалах, де $K_{\hat{d}} > 1$ та $K_{n\hat{d}} > 1$, знайдемо виправлені залишки $\Delta Y_{\hat{d}\hat{d}}$ і $\Delta Y_{n\hat{d}\hat{d}}$, звільнені від аномального збурювального впливу, за формулами

$$\Delta Y_{\hat{d}\hat{d}} = \Delta Y_{\hat{d}} - \left(\frac{\Delta Y_{\hat{d}}}{|\Delta Y_{\hat{d}}|} \right) |\Delta Y_{\hat{d}on}| (K_{\hat{d}} - 1),$$

$$\Delta Y_{n\hat{d}\hat{d}} = \Delta Y_{n\hat{d}} - \left(\frac{\Delta Y_{n\hat{d}}}{|\Delta Y_{n\hat{d}}|} \right) |\Delta Y_{\hat{d}on}| (K_{\hat{d}} - 1).$$

Замінивши в рядках $\Delta Y_{\hat{d}}$ і $\Delta Y_{n\hat{d}}$ їх аномальні значення на відповідні $\Delta Y_{\hat{d}\hat{d}}$ і $\Delta Y_{n\hat{d}\hat{d}}$ і додавши раніше виключені ймовірні значення рядів $\Delta Y_{i\hat{d}}$ та $\Delta Y_{in\hat{d}}$, отримаємо масиви добових і півдобових припливних спостережень, які позбавлені аномального впливу добових і півдобових збурювальних факторів. У подальшому ці ряди підсумовуємо та застосовуємо один із найточніших методів гармонічного аналізу [Venedikov, 1966].

У двох останніх рядках таблиці наведено результати гармонічного аналізу місячних серій нахиломірних спостережень на ст. «Катеринівка» за методом Венедікова [Venedikov, 1966] з роздільним виключенням відповідно змодельованих гармонічних та реально зареєстрованих аномальних збурень добових і півдобових хвиль припливних нахилів земної поверхні. Як видно, у цих двох випадках отримані параметри добових і півдобових припливних хвиль дуже близькі до ймовірних, що

наведені у першому рядку таблиці, а помилки їх визначень для добових хвиль у середньому не перевищують 2 % і 1° дуги відповідно для амплітуд і початкових фаз. Параметри півдобових хвиль отримані з меншими середньоквадратичними помилками та незначним відхиленням від їх відповідних імовірних значень (в середньому не більше 0,5 % та 0,4° дуги).

Отже, запропонована методика роздільного виключення аномальних збурювальних факторів може бути використана для переробки раніше виконаних нахиломірних і гравіметричних спостережень з метою підвищення точності визначення параметрів припливних хвиль.

Висновки. 1. Перевагою методу зняття дрейфу за допомогою «нульових точок» перед іншими аналогічними способами є можливість виключення на коротких інтервалах земноприпливної кривої його лінійного та аномального нелінійного внеску у параметри припливних хвиль.

2. Метод «нульових точок» зняття лінійного дрейфу в умовах аномального добового впливу збурювальних метеорологічних факторів добре очищає параметри добових припливних хвиль від цього впливу, але вносить значні систематичні помилки у параметри півдобових припливних хвиль.

3. Виключення лінійного дрейфу методом «нульових точок» та зняття аномального нелінійного тренду на коротких інтервалах часу із роздільним застосуванням для добових і півдобових припливних хвиль суттєво (на порядок) може підвищити точність визначення параметрів припливних хвиль, а отже, і чисел Лява, що характеризують фізичні властивості та внутрішню будову Землі.

4. Запропонована методика роздільного зняття дрейфу може бути використана для переробки раніше виконаних як нахиломірних, так і гравіметричних спостережень з метою уточнення параметрів припливних хвиль та дослідження фізичних властивостей тонких структур внутрішньої будови Землі.

Список літератури

Баленко В. Г. Исследование наклонов земной поверхности по профилю Киев—Артемовск. — Киев: Наук. думка, 1980. — С. 173.

Баленко В. Г., Кутный А. М., Новикова А. Н. Результаты наблюдений приливных наклонов на станции «Катериновка» // Вращение и при-

лив. деформации Земли. — 1972. — Вып. 4. — С. 65—75.

Баленко В. Г., Кутный А. М., Новикова А. Н. Результаты наклономерных наблюдений на станции «Березовая Рудка» // Вращение и прилив. деформации Земли. — 1978. — Вып. 10. — С. 14—22.

- Багмет А. Л., Кутный А. М. Эталонирование наклономеров с фотоэлектрическим увеличением на малых углах наклона // Вращение и прилив. деформации Земли. — 1973. — Вып. 5. — С. 50—55.
- Дычко И. А., Корба П. С. Результаты эталонирования гравиметра «Аскания» методом наклона // Вращение и прилив. деформации Земли. — 1973. — Вып. 5. — С. 73—75.
- Дубик Б. С. Исключение температурных влияний в земноприливных наблюдениях // Вращение и прилив. деформации Земли. — 1981. — Вып. 13. — С. 45—48.
- Дубик Б. С. Некоторые комбинации, которые могут иметь применение при обработке данных земноприливных наблюдений // Вращение и прилив. деформации Земли. — 1981. — Вып. 13. — С. 56—57.
- Крамер М. В. Таблицы приливных изменений силы тяжести от Луны и Солнца для абсолютно твердой Земли на 1962 г. — Москва: Ин-т физики Земли АН СССР, 1962.
- Кутный А. М., Бабич Т. М. Підвищення точності визначення резонансного впливу рідкого ядра Землі на земні приливи // Геофиз. журн. — 2010. — 32, № 3. — С. 140—142.
- Матвеев П. С., Богдан И. Д. Наблюдения наклонов земной поверхности на пунктах профиля Сумы—Херсон в 1964—1967 гг. // Вращение и прилив. деформации Земли. — 1970. — Вып. 2. — С. 8—18.
- Мельхиор П. Земные приливы. — Москва: Мир, 1968. — 482 с.
- Venedicov A. P. Une methode pour l'analyse des marees terrestres a partir d'enregistrements de longueur arbitraire // Observatoire Royal de Belgique Communication. Ser. Geophys. — 1966. — 250, № 71. — P. 437—459.
- Melior P. The tides of the planet Earth. — New York: Pergamon press, 1983. — 641 p.
- Chojnicki T. Determination de la dérive dans les mesures des marées au moyen de la methode des points neutres // Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci. — 1973. — 71. — P. 3—28.