

# Вплив метеорологічних факторів на параметри головних припливних хвиль у напрямку північ—південь

А.М. Кутний<sup>1</sup>, В.Г. Павлик<sup>1</sup>, Б.А. Кутний<sup>2</sup>, Т.М. Бабич<sup>1</sup>, 2026

<sup>1</sup>Полтавська гравіметрична обсерваторія

Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Полтава, Україна

<sup>2</sup>Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,

Полтава, Україна

Надійшла 11 січня 2026 р.

Для виявлення впливу метеорологічних факторів на нахиломірні параметри головних припливних хвиль, що мають важливе геофізичне значення, опрацьовано припливним гармонічним аналізом щогодинні ряди 11-річних нахиломірних спостережень у Полтаві для напрямку північ—південь та аналогічні 10-річні ряди температури повітря та атмосферного тиску. Виявлено значні систематичні збурення параметрів головних припливних хвиль і фазове запізнення добових збурюючих нахилів земної поверхні щодо температури повітря, які в січні—березні становлять 3 год, а в травні—грудні — 6 год. Встановлено, що причинами систематичних збурень припливних параметрів є деформаційні процеси шару ґрунту на глибині 10—25 см, зумовлені локальними екзогенними та ендегенними факторами, серед яких визначальними є: нестабільність теплового поля, волога ґрунту та довжина теплових хвиль в околі нахиломірного пункту. Залучаючи теорію термопружних деформацій, фізичні властивості ґрунту та параметри температурного поля, показано можливість звільнити параметри добових припливних хвиль від систематичних температурних збурень. Так, для хвилі  $K_1$  різниця амплітуд і зсувів фаз між отриманими зі спостережень температурними збурюючими нахилами та обчисленими на основі теорії термопружних деформацій виявилась у середньорічному вимірі практично відсутньою. Це переконливо свідчить про можливість і необхідність очищення спостережуваних даних від систематичного впливу температурних збурень з метою отримання достовірної геофізичної інформації. Атмосферний тиск практично не впливав на параметри півдобових і добових припливних хвиль місяцевого походження. Отримані результати переконливо вказують на вплив атмосферного тиску як на амплітуду, так і на фазу припливної хвилі сонячного походження  $S_2$ .

**Ключові слова:** земні припливи, нахиломірні спостереження, температурні та барометричні спостереження, земноприпливний гармонічний аналіз, термопружні деформації, достовірна геофізична інформація.

**Вступ.** Земні припливи, що досліджуються сучасними гравіметричними, нахиломірними та екстензометричними способами, є одним із джерел інформації про фізичний стан і внутрішню будову нашої планети. Отримані при цьому спостережу-

вані дані повинні бути високоточними та максимально достовірними. На практиці цим вимогам заважають екзогенні та ендегенні збурювальні фактори, що випадково та систематично впливають на корисну земноприпливну інформацію. Найбільш

Citation: Kutnyi, A.M., Pavlyk, V.G., Kutnyi, B.A., & Babych, T.M. (2026). The influence of meteorological factors on the parameters of the main tidal waves in the NS direction. *Geofizychnyi Zhurnal*, 48(3), 41—64. <https://doi.org/10.24028/gj.v48i3.349607>.

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2026. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

суттєвими з них є інструментальні, морські та метеорологічні. На сьогодні існує досконала методика калібрування засобів земноприпливних спостережень [Багмет, Кутний, 1973], що усуває з точністю до 0,1 % випадкові та систематичні помилки. Для вилучення морських припливів використовують методики, розроблені на основі котидальних карт, а також різних моделей океанічних припливів [Melchior, 1966; Schwiderski, 1980; Lyard et al., 2006]. На глибоко континентальних пунктах вплив морських припливів є незначним і визначається з точністю не гірше 0,1 %.

Вплив метеорологічних факторів (температура повітря, атмосферний тиск, вологість ґрунту, гідрологічні ефекти) досліджений ще недостатньо [Braitenberg, 2018; Petrosino et al., 2020; Sun et al., 2023]. Питання вилучення випадкових складових цих факторів вирішується шляхом збільшення періоду земноприпливних спостережень, а систематичних — лише частково при збільшенні числа пунктів. При цьому отримуємо досить високоточні припливні параметри, але, на жаль, ще мало достовірні, які не дають змоги однозначно вирішити питання резонансного ефекту ядра Землі та вибору найбільш достовірної моделі її будови [Bán et al., 2018; Cui et al., 2018], ймовірного провокуючого впливу земних припливів на землетруси [Varga, Grafarend, 2018], провісників вивержень вулканів [Peltier et al., 2016].

Насамперед необхідно дослідити ймовірний систематичний вплив температури повітря на припливні нахиломірні параметри головних добових хвиль  $K_1$  і  $O_1$ , який, як відомо, має глобальну, регіональну та локальну складові. Г. Жобер [Jobert, 1960] провів досить детальні дослідження температурних деформацій Землі і виявив, що глобальні та регіональні їх складові порівняно із земноприпливними є дуже малі і ними практично можна знехтувати. Безпосередній вплив температури повітря на нахиломірну апаратуру є також незначним, оскільки зазвичай її встановлюють у глибоких штольнях, шурфах і шахтах, де її добова амплітуда не перевищує 0,001 °С.

Проте локальні температурні деформації земної поверхні, спричинені переважно нерівностями рельєфу та неоднорідністю рослинного покриву в околі нахиломірної станції, під дією сонячної радіації можуть бути значними і суттєво впливати на параметри припливних хвиль.

Нахиломірні спостереження, проведені у шурфах глибиною 10—15 м співробітниками Полтавської гравіметричної обсерваторії Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України (ПГО) вздовж профілів Суми—Херсон та Київ—Артемівськ (нині Бахмут), підтверджують ці висновки. Так, для пунктів Шевченково [Баленко и др., 1970], Самотоївка [Матвеев и др., 1971], Катеринівка [Баленко и др., 1972], Судіївка [Матвеев и др., 1975], що в околі перших десятків метрів мають рівнинний рельєф і рівномірний та однаковий рослинний покрив, навіть у літній період не виявлено значних локальних температурних деформацій земної поверхні. Зовсім інша картина спостерігається на пунктах Мурахівка [Матвеев и др., 1974], Покровська Багачка [Баленко и др., 1975], Христофорівка [Голубицкий и др., 1977], Березова Рудка [Баленко и др., 1978], Перегонівка [Голубицкий и др., 1982], де в околі 10—20 м цих пунктів спостерігається різка зміна рослинного покриву на практично рівнинному рельєфі. Тут навіть на глибині 10—15 м локальні температурні нахили земної поверхні перевищують у літню пору припливні більше ніж на порядок. Аналіз щомісячних спостережень параметра  $\gamma$ , що виражає комбінацію чисел Лява  $h$  і  $k$  та є відношенням амплітуди спостережуваної припливної хвилі до її теоретичного аналогу, свідчить про систематичне його збільшення у літній період на всіх цих пунктах для добової хвилі  $K_1$ , оскільки вона має сонячне походження і її частота близька до частоти збурювального температурного впливу. Значне і систематичне збільшення параметра  $\gamma$  проявляється для напрямку NS (північ—південь), де її теоретичне значення для України не перевищує 1,4 mas. Але навіть при цьому може траплятись хоч і незначне, проте систематичне його збу-

рення в напрямку EW (схід—захід). Інша добова припливна хвиля  $O_1$  має місяцеве походження і її частота суттєво відрізняється від частоти температурного впливу. Тому систематичні чи напівсистематичні збурення її параметрів є значно меншими. Амплітудні фактори цих двох хвиль у земноприпливній практиці відіграють важливу геофізичну роль, оскільки наявність різниці їх амплітудних факторів  $\gamma$  може свідчити про резонансний ефект рідкого ядра, що лежить в основі найбільш достовірних моделей внутрішньої будови Землі [Wahr, 1981; Mathews et al., 1995]. Отже, параметри цих хвиль повинні бути достатньо високоточними та максимально достовірними, тобто позбавленими від різноманітних випадкових і систематичних похибок. На жаль, сучасний рівень опрацювання земноприпливних спостережень не гарантує надійного очищення амплітудних факторів цих хвиль від збурювального систематичного впливу, особливо температурного походження. Явний вплив термічного фактору на припливні хвилі нахилу виявлено в активній геодинамічній області південної Італії [Albano et al., 2015].

Головні півдобові припливні хвилі  $M_2$ ,  $N_2$  та  $S_2$ , амплітудні фактори  $\gamma$  яких складають основу для визначення чисел Лява, можуть також мати певний систематичний вклад температурного походження, що зменшує їх достовірність. Проте, як відомо, саме числа Лява є індикаторами вибору найбільш достовірної моделі внутрішньої будови Землі.

Систематичні збурення амплітудних гравіметричних і нахиломірних факторів хвилі  $S_2$ , що сягають величини 2 %, виявлено навіть на глибоко континентальній території України [Кутний та ін., 2015]. Таким чином, актуальність очищення земноприпливних спостережень від збурювальних впливів метеорологічного походження є очевидною.

**Методика опрацювання нахиломірних спостережень.** Співробітниками ПГО розроблено методики очищення припливного сигналу від метеорологічних збурень, але всі вони звільняють параметри приплив-

них хвиль лише від значних, тобто аномальних збурень [Булацен, Богдан, 1978; Кутний, Бабич, 2010]. При цьому не використовується жодна додаткова метеорологічна інформація. Тому надійність отриманих таким чином земноприпливних даних все ще певною мірою сумнівна. Сучасні методи опрацювання земноприпливних спостережень дають змогу залучати додаткову метеорологічну інформацію для аналізу даних шляхом знаходження відповідних кореляційних співвідношень між геофізичним та екзогенними сигналами [Wenzel, 1996; Schueller, 2015]. Але такий підхід також не вирішує остаточно цієї проблеми. Тому існує необхідність подальших досліджень з метою встановлення закономірностей систематичних збурень параметрів припливних хвиль і пошуку шляхів для підвищення їх точності та достовірності. Вплив добових коливань температури повітря відзначають також інші дослідники [Albano et al., 2015]. Для вилучення температурних збурень необхідно мати щонайменше річні одномоментні щогодинні ряди нахиломірних і температурних спостережень. На жаль, методика нахиломірних спостережень минулих років не передбачала використовувати температурну інформацію в околі нахиломірного пункту. Натомість ми скористались 11-річним рядом нахиломірних спостережень у Полтаві [Аксентьева и др., 1970] і даними спостережень у 2012—2021 рр. за температурою повітря та атмосферним тиском на розташованому неподалік майданчику Полтавської метеостанції [Метеопост, 2025].

Закономірності передачі тепла вглиб ґрунту сформулював Ж. Фур'є ще у 1822 р. Він встановив, що амплітуда добової температурної хвилі запізнюється з глибиною ґрунту за експоненціальним законом. Виконані ним розрахунки для добової температурної хвилі з коефіцієнтом температуропровідності ґрунту  $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  виявили, що на кожні 0,1 м глибини припадає майже дворазове зменшення температури ґрунту, а запізнення фази при цьому становить 3 години.

У ПГО поблизу гравіметричного підвалу організовано і ведуться регулярно спостереження за температурою приземного шару повітря і шару ґрунту на глибині 0,5 м. Отримані щогодинні температурні ряди опрацьовані щомісячно спеціальним земноприпливним гармонічним аналізом Венедікова [Venedicov, 1966], який на теоретичній припливній кривій, що є суперпозицією близько 500 припливних гармонік, виділяє параметри головних добових  $K_1$ ,  $O_1$  та півдобових  $N_2$ ,  $M_2$ ,  $S_2$  припливних хвиль з точністю не гірше 0,01 % за амплітудою та 0,17 град за фазою.

Результати параметрів добової хвилі  $K_1$ , представлені у табл. 1, свідчать про реальне запізнення на цих глибинах моментів максимумів добової температури на 3 і 6 годин відносно аналогічних значень приповерхневої температури повітря та про зменшення амплітуди у два рази зі збільшенням глибини ґрунту на кожні 0,1 м, що відповідає закону Фур'є.

Як бачимо, незважаючи на значний проміжок у часі від досліджень Фур'є, зменшення з глибиною температури ґрунту на кожні 0,1 м та відповідні зсуви фаз виявились практично незмінними.

Це підтверджує, що спроба виявлення температурних деформацій шляхом зіставлення нахиломірних спостережень за 1930—1941 рр. з метеорологічними спостереженнями за 2012—2021 рр. є небезпідставною, оскільки відповідає закону Фур'є. Міжнародна практика вимагає використання переважно синхронних наборів даних, але, на жаль, у земноприпливній практиці такі дані відсутні. Використовуючи фазові запізнення та зменшення температури ґрунту на кожні 0,1 м між нахиломірними та температурними сигналами за формулою Фур'є, визначаємо глибину шару ґрунту, який генерує температурні збурення. Встановлено, що у зимовий період глибина цього шару ґрунту становить 0,1 м, а в літній — 0,2 м.

Трансформуючи місячні щогодинні ряди температури повітря за законом Фур'є, отримуємо місячні температурні ряди на глибинах ґрунту 0,1 і 0,2 м, які разом з іншими його фізичними властивостями є вихідними даними для обчислення температурних збурювальних нахилів за теорією термопружних деформацій земної поверхні В. Попова [Широков, Анохина, 1975] чи С. Накано [Nakano, 1963].

**Т а б л и ц я 1.** Результати гармонічного аналізу добових параметрів температури повітря та ґрунту на глибині 0,5 м і зменшення амплітуди температури та зсуву фази на кожні 0,1 м глибини (за даними параметрів хвилі  $K_1$ )

Дата початку місячної серії	Температура повітря		Температура ґрунту на глибині 0,5 м		Різниця фаз $\Delta\varphi_{\text{п}} - \Delta\varphi_{\text{г}}$ рад	Зменшення з глибиною температури ґрунту на кожні 0,1 м, рази	Зсув фази температури ґрунту з глибиною на кожні 0,1 м, години
	$R_{\text{п}}$ °С	$\Delta\varphi_{\text{п}}$ рад	$R_{\text{г}}$ °С·10 <sup>-2</sup>	$\Delta\varphi_{\text{г}}$ рад			
01.04.2023	3,48±0,23	0,20±0,07	3,6±0,5	-4,63±0,14	4,84±0,15	2,5±0,2	3,6±0,6
11.04.2023	3,17±0,22	0,20±0,06	6,3±1,0	-4,14±0,06	4,34±0,09	2,2±0,2	3,2±0,3
01.05.2023	3,42±0,19	-0,29±0,06	7,5±0,4	-4,37±0,05	4,08±0,08	2,2±0,1	3,1±0,3
11.05.2023	2,96±0,22	-0,28±0,08	8,1±1,0	-4,93±0,05	4,66±0,09	2,1±0,2	3,2±0,4
31.05.2023	2,83±0,17	-0,64±0,06	7,0±0,4	-4,78±0,06	4,15±0,09	2,1±0,2	3,2±0,3
30.06.2023	3,37±0,07	-0,60±0,06	7,2±0,3	-5,15±0,13	4,56±0,14	2,1±0,1	3,5±0,6
10.07.2023	3,25±0,19	-1,03±0,06	6,5±0,4	-4,18±0,06	4,18±0,08	2,2±0,2	3,2±0,3
09.09.2023	6,26±0,62	-2,16±0,10	3,7±0,5	-6,06±0,01	3,77±0,16	2,7±0,6	2,9±0,6
<b>Середнє</b>	<b>3,59±0,24</b>	<b>-0,57±0,07</b>	<b>6,24±0,56</b>	<b>-4,49±0,08</b>	<b>4,32±0,11</b>	<b>2,21±0,22</b>	<b>3,24±0,42</b>

Надалі з місячних погодинних рядів нахиломірних спостережень вилучаються вираховані збурювальні температурні нахили і таким чином очищені місячні ряди припливних сигналів аналізуються гармонічним аналізом для отримання високоточних і достовірних параметрів припливних хвиль.

**Результати досліджень.** У цій публікації основну увагу приділено дослідженню впливу температури зовнішнього середовища в околі нахиломірного пункту на геофізично значимі параметри припливних хвиль.

З 11-річних рядів нахиломірних спостережень у напрямку NS вилучено ймовірні припливні нахили земної поверхні та лінійний тренд вихідних даних на коротких інтервалах часу [Кутний та ін., 2013]. У результаті отримано щогодинні річні ряди збурень припливних нахилів земної поверхні, які надалі опрацьовані земноприпливним гармонічним аналізом, який дає змогу виділити параметри головних добових  $O_1$ ,  $K_1$  та пів-

добових  $N_2$ ,  $M_2$ ,  $S_2$  припливних хвиль.

Аналогічним чином опрацьовані ряди температурних і барометричних спостережень.

Звичайно, такий підхід для вирішення

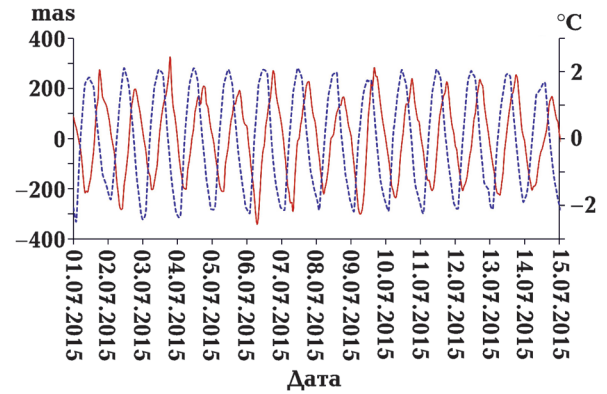


Рис. 1. Фрагмент запису збурюючих нахилів земної поверхні та температури повітря. Суцільна крива — збурювальні нахили, пунктирна — відхилення температури повітря від середнього значення.

Fig. 1. Fragment of the record of perturbing tilts of the ground and air temperature. The solid curve is the perturbing tilts, the dotted curve is the deviation of the air temperature from the average value.

**Т а б л и ц я 2. Результати гармонічного аналізу збурювальних нахилів земної поверхні і температури повітря на частоті припливної хвилі  $K_1$  (теоретична припливна амплітуда  $R_1=1,4408$  mas ) для напрямку NS**

Місяці року	Збурювальні нахили		Температура повітря		Зсуви фаз $\chi=\Delta\varphi_{II}-\Delta\varphi_3$	
	$R_3$ , mas	$\Delta\varphi_3$ , рад	$R_{II}$ , °C	$\Delta\varphi_{II}$ , рад	рад	години
1	6,49±0,62	1,0±0,07	0,64±0,02	1,76±0,13	0,76±0,13	2,9±0,5
2	8,97±1,96	0,61±0,05	1,48±0,07	1,24±0,05	0,62±0,24	2,4±0,9
3	9,99±2,27	-0,27±0,04	3,58±0,16	0,44±0,04	0,71±0,23	2,7±0,9
4	13,49±0,69	-0,68±0,03	3,97±0,10	0,02±0,03	0,69±0,23	2,6±0,2
5	13,75±0,52	-1,63±0,02	3,54±0,08	-0,30±0,03	1,34±0,04	5,1±0,2
6	9,94±0,76	-2,13±0,03	3,11±0,05	-0,55±0,02	1,58±0,08	6,1±0,3
7	16,21±0,67	-2,39±0,02	3,60±0,09	-0,83±0,02	1,56±0,05	6,0±0,2
8	24,78±3,04	-2,78±0,03	5,03±0,12	-1,29±0,02	1,48±0,05	5,7±0,2
9	29,68±1,82	-3,33±0,06	5,84±0,28	-2,07±0,05	1,26±0,08	4,6±0,3
10	17,85±2,25	2,02±0,05	3,52±0,17	-3,03±0,05	1,23±0,13	4,7±0,5
11	6,02±0,46	0,96±0,08	1,28±0,11	2,55±0,04	1,58±0,12	6,0±0,4
12	3,89±0,38	0,64±0,07	0,49±0,04	2,09±0,08	1,46±0,13	5,6±0,5
<b>Середнє за рік</b>	<b>19,93±1,22</b>	<b>-0,67±0,09</b>	<b>3,01±0,17</b>	<b>0,01±0,05</b>	<b>I кв. 0,69±0,07 II—IV кв. 1,44±0,10</b>	<b>I кв. 2,7±0,3 II—IV кв. 5,5±0,3</b>

поставленого завдання не є ідеальним, але середньостатистичні дані на значних інтервалах спостережень навіть у різні епохи можуть бути близькими до реальних одномоментних рядів нахиломірних і температурних спостережень. Фрагмент отриманих таким чином рядів показано на рис. 1.

У кожному із цих спостережуваних рядів чітко виділяються добові складові, які дуже подібні за формою, але помітно зсунуті за фазою. Так, максимум збурювальних нахилів земної поверхні постійно запізнюється відносно моменту температурного максимуму. Це свідчить про непрямий функціональний зв'язок між цими рядами.

Для більш детального дослідження ці ряди були розбиті на 102 щогодинних одномоментних місячних інтервали та опрацьовані гармонічним аналізом за схемою Венедікова.

Отримані при цьому щомісячні амплі-

туди збурювальних нахилів  $R_3$  та температури повітря  $R_{\text{п}}$  і відповідні зсуви фаз  $\Delta\varphi_3$  і  $\Delta\varphi_{\text{п}}$ , а також їх різниці зсувів фаз  $\chi = \Delta\varphi_3 - \Delta\varphi_{\text{п}}$ , осереднені помісячно на частотах хвиль  $K_1$  та  $O_1$  з урахуванням ваг, обернено-пропорційних квадратам середньоквадратичних помилок, наведено у табл. 2 і 3.

Тут індекси «з» і «п» відповідають зареєстрованим збурювальним нахилам земної поверхні і температури повітря відповідно.

Цікавим фактом є наявність постійної різниці зсуву фаз  $\chi$  між збурювальними нахилами земної поверхні і температурою повітря для хвилі  $K_1$ . Так, фази збурювальних нахилів для зимових місяців запізнюються на 3 години порівняно з одномоментними фазами температури повітря, а в інші періоди року — майже на 6 годин. Імовірно, це обумовлено наявністю чи відсутністю рослинного покриву та різними фізичними властивостями ґрунту у ці періоди року. Виявлена різниця зсуву

**Т а б л и ц я 3. Результати гармонічного аналізу збурювальних нахилів земної поверхні і температури повітря на частоті хвилі  $O_1$  (теоретична припливна амплітуда  $R_1=1,024$  mas) для напрямку NS**

Місяці року	Збурювальні нахили		Температура повітря		Зсув фаз $\chi = \Delta\varphi_{\text{п}} - \Delta\varphi_3$	
	$R_3$ , mas	$\Delta\varphi_3$ , рад	$R_{\text{п}}$ , °C	$\Delta\varphi_{\text{п}}$ , рад	рад	ГОДИНИ $\chi = \Delta\varphi_{\text{п}} - \Delta\varphi_3$
1	1,512±0,397	0,01±0,34	0,25±0,03	0,07±0,43	0,06±0,55	0,2
2	0,923±0,015	-0,21±0,23	0,32±0,07	0,33±0,38	0,54±0,45	2,2
3	1,930±0,190	-0,04±0,36	0,39±0,10	-0,50±0,32	-0,46±0,48	-1,9
4	1,127±0,178	-0,89±0,33	0,21±0,05	0,21±0,53	1,10±0,62	4,5
5	0,923±0,124	-0,46±0,19	0,36±0,06	-0,01±0,43	0,46±0,47	1,9
6	0,820±0,183	-0,67±0,18	0,34±0,06	-0,95±0,41	-0,28±0,45	-1,2
7	1,897±0,131	-1,76±0,38	0,28±0,05	0,71±0,48	2,47±0,61	10,2
8	2,241±0,297	-0,70±0,25	0,53±0,09	-0,04±0,32	0,66±0,41	2,7
9	2,643±0,037	-0,19±0,07	0,50±0,08	1,71±0,38	1,90±0,39	7,8
10	1,169±0,164	-0,24±0,30	0,35±0,11	-0,13±0,36	0,12±0,47	0,5
11	0,638±0,097	-0,10±0,10	0,33±0,06	0,32±0,42	0,41±0,44	1,7
12	1,029±0,087	-0,87±0,24	0,21±0,04	0,61±0,49	1,48±0,55	6,1
<b>Середнє за рік</b>	<b>1,161±0,179</b>	<b>-0,31±0,09</b>	<b>0,29±0,02</b>	<b>0,14±0,20</b>	<b>0,67±0,25</b>	—

фаз  $\chi$  свідчить, що генеруючий збурювальні нахили шар ґрунту не є поверхневим, який безпосередньо контактує з повітрям, а знаходиться на певній глибині.

Отже, виявлена різниця зсуву фаз  $\chi$  на величину 3 і 6 годин, зареєстрована у напрямку NS на нахиломірній станції «Полтава», ймовірно, згідно з законом Фур'є, спричинена температурною деформацією шару ґрунту на глибинах 0,1 і 0,25 м відповідно. Саме він, нерівномірно і із запізненням нагріваючись, деформується та зумовлює в околі нахиломірного пункту теплові збурення припливних нахилів земної поверхні.

За ідеальних умов, коли в околі пункту до 100 м рівнинний рельєф, рівномірний рослинний покрив, однакові одномоментна температура та фізичні властивості ґрунту, локальні деформації, а відтак і збурювальні нахили відсутні. Але достатньо нестабільності одного із цих факторів, як під дією рівномірної сонячної радіації виникне різниця одномоментних температур у шарі ґрунту, що спричинить появу його локальних деформацій, які практично без запізнення передаються у більш глибокі шари, зменшуючи при цьому свою амплітуду. У більшості випадків різниці одномоментних температур ґрунту виникають між освітленими та затіненими ділянками, що знаходяться поблизу пункту спостережень.

Локальні одномоментні температурні різниці ґрунту на глибині 0,1 м в освітлених і затінених місцях сягають кількох градусів Цельсія і можуть суттєво впливати на його деформаційні процеси. Ці різниці є дзеркальним відображенням температури повітря, але вони менші за величиною і зсунуті за фазою. Фрагмент паралельного запису температури повітря і різниці температур на освітленій та затіненій ділянках земної поверхні на глибині 0,1 м представлений на рис. 2.

Іншим важливим чинником, що впливає на амплітуду локальних деформацій земної поверхні, є відстань між нерівномірно освітленими ділянками поблизу земноприпливного пункту, де спостеріга-

ються одномоментні максимальні різниці температури. Вона характеризує розмір температурного поля і фактично являє собою довжину збурювальної температурної хвилі. За однакових одномоментних різниць температури ґрунту на затінених і освітлених ділянках найбільші його деформації спричиняють короткі теплові хвилі, але зі збільшенням глибини ґрунту вони інтенсивніше затухають. Більш предметні особливості цих деформаційних процесів, що відбуваються у шарах ґрунту на різних глибинах, викладено у теоретичних роботах В. Попова [Анохина, Широков, 1974] і С. Накано [Nakano, 1963]. Автори доходять практично однакових висновків, хоч у своїх викладках використовують різні фізичні параметри ґрунту. Теорія В. Попова ґрунтується на коефіцієнтах Пуассона і температурного розширення ґрунту, а теорія С. Накано — на модулях його жорсткості та стиснення. Обидва автори виходять з того, що на земній поверхні при неоднорідному тепловому нагріванні розповсюджується плоска температурна хвиля з певною амплітудою і циклічною частотою. Вони знаходять температурне поле однорідно-

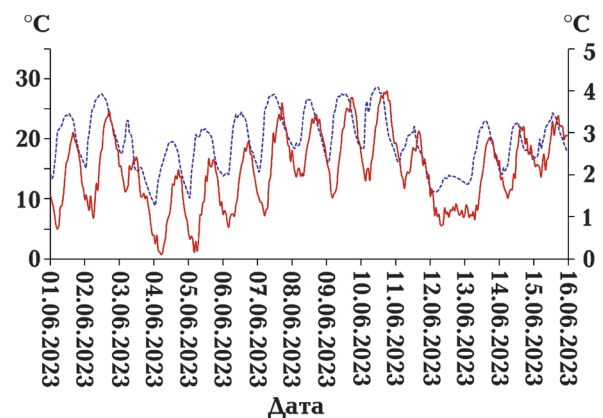


Рис. 2. Фрагмент паралельного запису температури повітря і різниці температур на освітленій і затіненій ділянках земної поверхні на глибині 0,1 м. Суцільна крива — температура повітря, пунктирна — різниці температур.

Fig. 2. Fragment of a parallel recording of air temperature and temperature difference on illuminated and shaded areas of the ground at a depth of 0,1 m. The solid curve is air temperature, the dotted curve is temperature difference.

го напівпростору при встановленому температурному режимі, розв'язують плоску температурну задачу, і використовуючи узагальнений закон Гука, отримують деформації та нахили земної поверхні.

Формула В. Попова для нахилів  $\phi$ , що детально опрацьована [Широков, Анохина, 1975], має вигляд:

$$\phi = \frac{\alpha V_0}{1 - \sigma} (F_{x,l} + M_{x,l} \Phi_{x,l}) \sin \frac{2\pi}{\ell} y, \quad (1)$$

де

$$F_{x,l} = \left( P_\psi - \frac{\sqrt{2}}{2} Q_\psi \right) e^{-\frac{2\pi}{\ell} z}, \quad (2)$$

$$M_{x,l} = (1 + \sigma) \frac{2\pi}{\ell} \frac{1}{\sqrt{2}k} e^{-kz}, \quad (3)$$

$$\Phi_{x,l} = \cos kz - (1 + \sigma) \left( \frac{2\pi}{\ell} \right)^2 \frac{1}{2k^2} \sin kz, \quad (4)$$

$$P_\psi = (1 + \sigma) \frac{2\pi}{\ell \sqrt{2}} \frac{1}{k} \left[ \frac{2\pi}{\ell} z + (1 - 2\sigma) \right], \quad (5)$$

$$Q_\psi = \left( \frac{2\pi}{\ell} \right)^2 \frac{1}{k^2} \left[ 2(1 - \sigma) + (1 + \sigma) \left( \frac{2\pi}{\ell} \right) z \right], \quad (6)$$

$$k = \sqrt{\frac{\omega}{2a^2}}, \quad (7)$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт лінійного температурного розширення ґрунту,  $\sigma$  — коефіцієнт Пуассона,  $z$  — глибина шару ґрунту,  $a^2$  — коефіцієнт теплопровідності ґрунту,  $\omega$  і  $V_0$  — циклічна частота та амплітуда температурної хвилі відповідно.

Що стосується температурного коефіцієнта  $\alpha$ , який безпосередньо впливає на температурні нахили земної поверхні, то С. Накано і В. Попов вважають, що він становить  $8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Але розрахунки нахилів на поверхні ґрунту при цьому майже вдвічі перевищують реально спостережені [Анохина, Широков, 1974; Гриднев, 1975]. Інформація про залежність цього коефіцієнта від типу ґрунтів практично відсутня. Відомо лише, що він обернено пропорційно залежить від вологості ґрунту, яка має досить чіткий сезонний характер (рис. 3).

Ці дані отримані на геодинамічному полігоні у Полтаві та осереднені помісячно. Непрямим свідченням того, що темпера-

турний коефіцієнт розширення ґрунту  $\alpha$  залежить від стану його вологості, є багаторічні дані спостережень сезонних змін добової амплітуди шару ґрунту на глибині 0,4 м, зареєстровані на полігонах у Полтаві та Судіївці за допомогою вертикальних свердловинних екстензометрів [Кутний і др., 1992]. Осереднені помісячно ці амплітуди показані на рис. 4, де досить виражено спостерігається їх сезонний хід і залежність від варіацій вологи ґрунту.

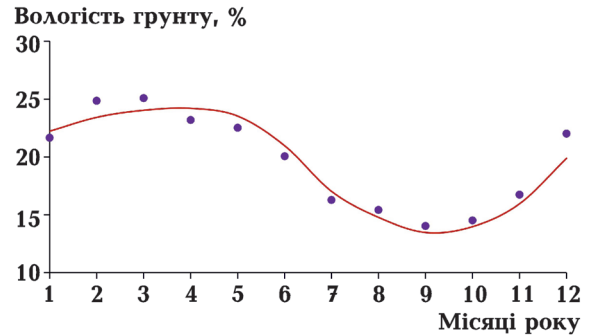


Рис. 3. Осереднені за період 2016—2020 рр. сезонні зміни вологи ґрунту на глибині 0,5 м у Полтаві за даними електронного вологоміра (суцільна лінія) і термостатно-вагового методу (крапки).

Fig. 3. Averaged seasonal changes in soil moisture at a depth of 0.5 m in Poltava for the period 2016—2020 according to data from an electronic moisture meter (solid line) and the thermostat-weight technique (dots).

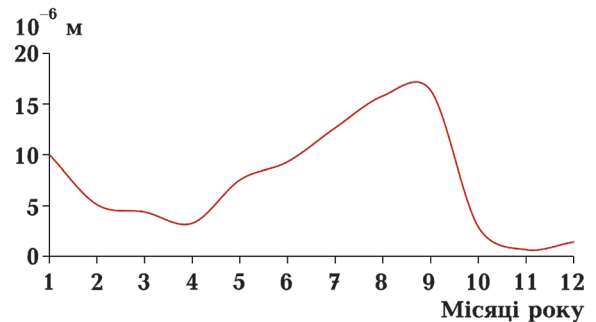


Рис. 4. Сезонні зміни амплітуд добових вертикальних рухів ґрунту на глибині 0,4 м, осереднені помісячно за 2011—2012 рр. за даними вертикального екстензометра на геодинамічному полігоні у Полтаві.

Fig. 4. Seasonal changes in the amplitudes of daily vertical soil movements at a depth of 0.4 m, averaged monthly for 2011—2012 according to data from a vertical extensometer at the geodynamic test area in Poltava.

Залежність коефіцієнта температурного розширення ґрунту від його вологості цілком достовірна, оскільки екстремальні значення обох параметрів припадають на одні й ті самі місяці року.

У наших розрахунках прийнято, що для  $i$ -го місяця року

$$\alpha_i = \alpha_0 \frac{108}{W}, \quad (8)$$

де  $\alpha_0 = 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $W$  — вологість ґрунту у відсотках.

Число 108 підбрано таким чином, щоб при мінімальній вологості ґрунту, яка, як видно з рис. 3, припадає на вересень,  $\alpha_i$  дорівнювало  $5,6 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Оскільки температурні нахили земної поверхні пропорційно залежать від коефіцієнта  $\alpha$ , то

$$\varphi_i = \varphi_0 \alpha_i. \quad (9)$$

Авторами виконані розрахунки нахилів земної поверхні за формулами В. Попова, приймаючи такі значення параметрів:  $V_0 = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_0 = 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\sigma = 0,4$ ;  $\alpha^2 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ ;  $z$  — від 4 до 12 м;  $\ell = 12 \text{ м}$ ;  $\omega = 0,72 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ .

Отримані при цьому результати представлені на рис. 5, де на глибині 5 м  $\varphi_0 = 3,59 \text{ mas}/^\circ\text{C}$ , а на глибині 12 м, де проведені нахиломірні спостереження у шурфах [Матвеев и др., 1977; Баленко, 1980],  $\varphi_0 = 0,206 \text{ mas}/^\circ\text{C}$ .

Як бачимо, неоднорідність нагрівання земної поверхні при добовій зміні одномо-

ментних різниць температури  $1^\circ\text{C}$  призводить до виникнення суттєвих локальних нахилів. З глибиною ступінь затухання цих нахилів та їх величина практично обернено пропорційні довжинам теплових хвиль, що характеризуються параметром  $\ell$ . При значних температурах повітря у липні—серпні розрахункові локальні поверхневі добові температурні нахили можуть сягати  $2\text{—}3 \text{ arcsec}$ , що підтверджується результатами реальних спостережень [Анохина, Широков, 1974].

Розглянемо можливість використання цих теоретичних розрахунків (див. рис. 5) для очищення земноприливних спостережень від впливу температурних збурень. Зауважимо, що наведені тут дані фактично представляють коефіцієнти трансформації температури певного шару ґрунту у збурювальні його нахили на різних глибинах залежно від параметра  $\ell$ , що характеризує довжину теплової хвилі. Скористаємося реальними температурними та збурювальними рядами спостережень у Полтаві, параметри яких наведено у табл. 2 для хвилі  $K_1$ . Припустимо, що різниці температур між освітленими та затіненими ділянками на глибині 0,2 м тут пропорційні температурі поверхневого шару ґрунту з коефіцієнтом трансформації і фазовим запізненням, отриманими нами згідно із законом Фур'є.

Із ситуаційного плану розташування нахиломірної станції встановлено ймовірну відстань між затіненими і освітленими ділянками. Так, в її околі місцевість має рівнинний характер і в період спостережень була покрита невисокою трав'яною рослинністю. Вертикальний переріз камери спостережень у напрямку NS за формою близький до трапеції з основою 12 м. Тому, відстань між підніжжями насипу в цьому напрямку є ймовірною довжиною  $\ell$  температурної хвилі. У зимовий період для отримання температурних рядів ґрунту ми трансформували температурні ряди повітря з коефіцієнтом 0,5, оскільки виявлений зсув фаз між відповідними рядами спостережених збурювальних нахилів земної поверхні і температури повітря

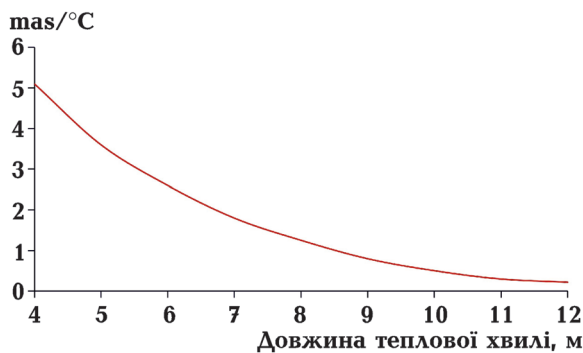


Рис. 5. Розрахунок теплових нахилів земної поверхні за формулами В. Попова.

Fig. 5. Calculation of thermal tilts of ground according to V. Popov's formulas.

Таблиця 4. Результати гармонічного аналізу місячних рядів спостережених температурних збурень та аналогічних виміряваних на частоті припливної добової хвилі  $K_1$  ( $R_T=1,44mas$ ) у напрямку NS

Місяці року	Середньомісячна амплітуда температури повітря, $R_{T1}^m$ , °C	Коефіцієнт трансформації температурного ряду повітря у ряд збурювальних нахилів		Зсув фази температурного ряду повітря по відношенню до температурного ряду збурювальних нахилів, $\gamma$ , год	Результати гармонічного аналізу рядів температурних збурювальних нахилів земної поверхні		Вологість ґрунту, %	Коефіцієнт температурного розширення ґрунту $\alpha_t \cdot 10^6$	Відношення вирахуваних нахилів на габідині 6 м, при $l=12$ м та $\varphi_t=\varphi_{a_t}$ до амплітуди температура-турної хвилі 1 °C, mas/°C	Параметри вирахуваних збурювальних нахилів земної поверхні на габідині 5 м		Параметри спостережених температурних збурювальних нахилів земної поверхні		Замішки систематичних збурень параметрів добової припливної хвилі $K_1$			
		$R_{3t}$ , °C	$\Delta\varphi_{3t}$ , рад		$R_{Bt}$ , mas	$\Delta\varphi_{3t}$ , рад				$R_{Ct}$ , mas	$\Delta\varphi_{Ct}$ , рад	$R_{B-R_{Ct}}$ , mas	$\Delta\varphi_{C-R_{Ct}}$ , рад				
1	0,64±0,20	0,32±0,10	1,00±0,07	2,9±0,5	0,50	2,9±0,5	22,2	3,4	12,2	3,89±1,24	1,01±0,07	6,49±0,62	1,0±0,10	-2,60±1,35	-0,01±0,40		
2	1,48±0,07	0,74±0,04	0,61±0,05	2,4±0,9	0,50	2,4±0,9	23,4	3,2	11,5	8,59±0,47	0,60±0,05	8,97±1,69	0,61±0,23	-0,38±1,76	0,02±0,14		
3	3,58±0,16	0,90±0,04	-0,27±0,04	2,7±0,9	0,25	2,7±0,9	24,0	3,1	11,2	10,13±0,46	-0,24±0,05	9,99±2,27	-0,27±0,23	0,14±2,32	-0,04±0,15		
4	3,97±0,10	0,99±0,03	-0,68±0,03	2,6±0,2	0,25	2,6±0,2	24,2	3,1	11,2	11,05±0,34	-0,78±0,03	13,49±0,69	-0,68±0,05	-2,44±0,75	0,08±0,34		
5	3,54±0,08	0,89±0,02	-1,63±0,02	5,1±0,2	0,25	5,1±0,2	23,5	3,2	11,5	10,23±0,23	-1,66±0,02	13,75±0,52	-1,63±0,04	-3,50±0,56	0,02±0,25		
6	3,11±0,05	0,78±0,01	-2,13±0,02	6,1±0,3	0,25	6,1±0,3	21,0	3,6	12,9	10,03±0,13	-2,12±0,02	9,94±0,76	-2,13±0,08	0,09±0,77	-0,01±0,07		
7	3,60±0,08	0,90±0,02	-2,39±0,02	6,0±0,2	0,25	6,0±0,2	17,0	4,4	15,9	14,29±0,32	-2,37±0,02	16,21±0,67	-2,39±0,04	-1,92±0,73	-0,03±0,14		
8	5,03±0,12	1,26±0,03	-2,78±0,03	5,7±0,2	0,25	5,7±0,2	14,8	5,1	18,2	22,99±0,56	-2,74±0,03	24,78±3,04	-2,78±0,04	-1,793,10	-0,04±0,06		
9	5,84±0,28	1,46±0,07	-2,96±0,06	4,8±0,3	0,25	4,8±0,3	13,5	5,6	20,0	29,20±1,43	3,00±0,05	29,68±0,42	2,96±0,06	-0,48±1,46	-0,04±0,09		
10	3,52±0,17	0,88±0,04	2,02±0,05	4,7±0,5	0,25	4,7±0,5	14,0	5,4	19,3	16,97±0,79	2,04±0,05	17,85±2,25	2,02±0,12	-0,88±2,39	-0,02±0,31		
11	1,28±0,11	0,32±0,03	0,96±0,08	6,0±0,4	0,25	6,0±0,4	15,9	4,7	17,0	5,43±0,52	0,96±0,08	6,02±0,46	0,96±0,08	-0,59±0,69	0,01±0,18		
12	0,49±0,40	0,12±0,10	0,64±0,07	5,6±0,5	0,50	5,6±0,5	19,9	3,8	13,6	1,53±1,38	0,60±0,07	3,89±0,38	0,64±0,10	-2,36±1,45	0,04±0,35		
<b>Середнє за рік</b>														<b>-0,024±0,08</b>		<b>-0,023±0,08</b>	

становить 3 години, що відповідає закону Фур'є і даним табл. 1 для шару ґрунту на глибині 0,1 м. В інші періоди року відповідний зсув фаз становить 6 годин, що відповідає шару ґрунту на глибині 0,2 м, і для отримання рядів температури ґрунту на цій глибині відповідні температурні ряди повітря трансформовані у 0,25 раз. Отримані таким чином ряди температурних нахиломірних збурень опрацьовані земноприпливним гармонічним аналізом Венедікова. Щомісячні параметри добової хвилі  $K_1$  наведено у табл. 4 у стовпцях 5 і 6. Тут, у колонці 7 подано осереднені помісячно результати вологості ґрунту за період спостережень з 2010 по 2015 р., а коефіцієнти  $\alpha_i$  та  $\phi_i$  — у стовпцях 8 і 9. Для отримання вирахованих щомісячних параметрів температурних нахилів земної поверхні на припливній частоті добової хвилі  $K_1$  щомісячні температурні ряди помножені на значення  $\phi_i$  та опрацьовані гармонічним аналізом Венедікова. Отримані результати наведено у колонках 10 і 11 табл. 4. Для співставлення аналогічні параметри спостережених температурних збурювальних нахилів земної поверхні

наведено у колонках 12 і 13, а різниці амплітуд і зсувів фаз між спостереженими та вирахованими збурювальними нахилами — в колонках 14 і 15.

Іншим ймовірним чинником, що може збурювати параметри припливних хвиль, є атмосферний тиск. З метою виявлення його впливу річні ряди спостережень атмосферного тиску, отримані за період з 2012 по 2021 р. на полігоні Полтавської метеостанції, опрацьовані аналогічно температурним. Отримані результати барометричних амплітуд і зсувів фаз на частотах добових припливних хвиль  $K_1$  і  $O_1$  наведено помісячно у табл. 5 та 6 відповідно. Для співставлення наведено помісячні параметри збурювальних нахилів земної поверхні.

Розглянемо вплив метеорологічних факторів на параметри головних півдобових припливних хвиль, які також мають важливу геофізичну інформацію. Амплітуда головної припливної хвилі  $M_2$  на широті Полтави становить 7,68 mas, а хвилі  $N_2$  — лише п'яту її частину. Ці хвилі місяцевого походження, і тому частоти їх вигідно відрізняються від частот метеорологічних

**Таблиця 5. Результати гармонічного аналізу збурювальних нахилів земної поверхні і атмосферного тиску на частоті припливної хвилі  $K_1$  (теоретична припливна амплітуда  $R_T=1,4408$  mas) для напрямку NS**

Місяці року	Збурювальні нахили		Атмосферний тиск		Зсув фаз $\varphi = \Delta\phi_{ат} - \Delta\phi_3$ , рад
	$R_3$ , mas	$\Delta\phi_3$ , рад	$R_{ат}$ , $10^2$ Па	$\Delta\phi_{ат}$ , рад	
1	6,49±0,62	1,0±0,10	0,291±0,012	-2,60±0,58	-3,60±0,58
2	8,97±1,96	0,61±0,23	0,253±0,044	-2,42±0,59	-3,03±0,63
3	9,99±2,27	-0,27±0,23	0,351±0,063	-2,80±0,52	-2,53±0,57
4	13,49±0,69	-0,68±0,05	0,307±0,068	-4,05±0,35	-3,38±0,36
5	13,75±0,52	-1,63±0,04	0,355±0,051	-4,82±0,08	-3,19±0,09
6	12,50±0,76	-2,13±0,08	0,234±0,031	-5,20±0,15	-3,06±0,17
7	16,21±0,67	-2,39±0,04	0,271±0,029	-4,72±0,52	-2,38±0,52
8	21,78±3,04	-2,78±0,01	0,353±0,044	-5,61±0,14	-2,83±0,15
9	29,68±1,82	-3,33±0,06	0,362±0,072	-4,67±0,67	-1,35±0,68
10	17,83±1,46	2,02±0,12	0,249±0,039	-2,46±0,56	-4,48±0,58
11	6,02±0,46	0,96±0,08	0,173±0,030	-2,90±0,57	-3,86±0,57
12	3,89±0,38	0,64±0,10	0,193±0,041	-2,76±0,45	3,40±0,46
<b>Середнє за рік</b>	<b>19,93±1,22</b>	<b>-0,67±0,09</b>	<b>0,261±0,028</b>	<b>-3,75±0,35</b>	<b>-3,09±0,79</b>

**Таблиця 6.** Результати гармонічного аналізу збурювальних нахилів земної поверхні і атмосферного тиску на частоті припливної хвилі  $O_1$  (теоретична припливна амплітуда  $R_T=1,024$  mas) для напрямку NS

Місяці року	Збурювальні нахили		Атмосферний тиск		Зсув фаз $\chi=\Delta\varphi_{ат}-\Delta\varphi_3$ , рад
	$R_3$ , mas	$\Delta\varphi_3$ , рад	$R_{ат}$ , $10^2$ Па	$\Delta\varphi_{ат}$ , рад	
1	1,512±0,397	0,01±0,34	0,262±0,080	-2,82±0,52	-2,83±0,62
2	0,923±0,015	-0,21±0,23	0,258±0,038	-3,31±0,73	-3,09±0,76
3	0,193±0,190	-0,04±0,36	0,282±0,048	-3,94±0,50	-3,37±0,61
4	1,127±0,178	-0,89±0,33	0,240±0,023	-3,94±0,44	-3,05±0,54
5	0,923±0,124	-0,46±0,19	0,177±0,033	-2,96±0,70	-2,50±0,72
6	0,820±0,183	-0,67±0,18	0,150±0,017	-2,38±0,51	-1,71±0,54
7	1,897±0,131	-1,76±0,38	0,123±0,016	-2,92±0,66	-1,16±0,76
8	2,241±0,297	-0,70±0,25	0,125±0,017	-3,72±0,54	-3,02±0,60
9	2,643±0,037	-0,19±0,07	0,162±0,024	-2,66±0,65	-2,47±0,65
10	1,169±0,164	-0,24±0,30	0,231±0,032	-2,69±0,64	-2,45±0,70
11	0,638±0,097	-0,10±0,10	0,312±0,043	-3,08±0,55	-2,99±0,56
12	1,029±1,087	-0,87±0,24	0,345±0,062	-3,94±0,30	-3,07±0,38
<b>Середнє за рік</b>	<b>1,161±0,179</b>	<b>-0,31±0,09</b>	<b>0,172±0,017</b>	<b>-3,38±0,17</b>	<b>-3,07±0,71</b>

**Таблиця 7.** Результати гармонічного аналізу збурювальних нахилів земної поверхні і температури повітря на частоті припливної хвилі  $M_2$  (теоретична припливна амплітуда  $R_T=7,80$  mas) для напрямку NS

Місяці року	Збурювальні нахили		Температура повітря		Зсув фаз $\chi=\Delta\varphi_{т}-\Delta\varphi_3$ , рад
	$R_3$ , mas	$\Delta\varphi_3$ , рад	$R_{т}$ , °C	$\Delta\varphi_{т}$ , рад	
1	0,819±0,025	0,01±0,05	0,43±0,12	2,00±0,64	2,00
2	0,773±0,091	-0,04±0,03	0,61±0,08	1,03±0,77	1,07
3	0,675±0,223	0,01±0,04	0,63±0,11	0,15±0,56	0,15
4	0,804±0,060	-0,01±0,03	0,55±0,12	0,21±0,44	0,22
5	0,540±0,064	0,01±0,03	0,86±0,15	0,37±0,65	0,37
6	0,618±0,090	-0,01±0,01	0,88±0,14	0,16±0,16	0,16
7	0,609±0,094	-0,02±0,01	0,69±0,12	-0,39±0,59	0,42
8	0,750±0,011	0,01±0,02	0,66±0,11	-0,46±0,62	0,46
9	1,511±0,294	0,01±0,02	0,76±0,12	0,07±0,66	0,07
10	0,639±0,131	0,01±0,01	0,65±0,13	0,49±0,71	0,49
11	0,390±0,082	-0,02±0,03	0,68±0,09	-0,402±0,60	0,42
12	0,659±0,146	0,01±0,02	0,73±0,13	1,12±0,41	1,11
<b>Середнє за рік</b>	<b>0,749±0,020</b>	<b>-0,01±0,01</b>	<b>0,64±0,01</b>	<b>0,38±0,20</b>	<b>0,58±0,16</b>

факторів. Проте реальний вплив цих збурень ще недостатньо досліджений.

Ми опрацювали можливий вплив температури і атмосферного тиску на параметри хвиль  $M_2$  і  $N_2$  за методикою, аналогічною

для добових хвиль. Отримані таким чином параметри впливу температури повітря та атмосферного тиску наведено у табл. 7—10 для цих хвиль відповідно.

Хвиля  $S_2$  сонячного походження має

**Таблиця 8.** Результати гармонічного аналізу збурювальних нахилів земної поверхні і атмосферного тиску на частоті припливної хвилі  $M_2$  (теоретична припливна амплітуда  $R_T=7,80$  mas) для напрямку NS

Місяці року	Збурювальні нахили		Атмосферний тиск		Зсув фаз $\varphi=\Delta\varphi_{ат}-\Delta\varphi_з$ , рад
	$R_з$ , mas	$\Delta\varphi_з$ , рад	$R_{ат}$ , $10^{-1}$ Па	$\Delta\varphi_{ат}$ , рад	
1	0,819±0,025	0,01±0,05	43,4±6,6	1,38±0,42	1,37±0,42
2	0,773±0,091	-0,04±0,03	29,5±4,0	-2,77±0,69	-2,72±0,69
3	0,675±0,223	0,01±0,04	56,1±7,1	-2,54±0,63	-2,55±0,63
4	0,804±0,060	-0,01±0,03	32,9±6,9	-3,45±0,64	-3,45±0,64
5	0,540±0,064	0,01±0,03	45,9±7,6	-2,78±0,65	-2,79±0,65
6	0,618±0,090	-0,01±0,01	35,2±6,4	-1,98±0,67	-1,97±0,67
7	0,609±0,094	-0,02±0,01	41,8±4,8	-2,81±0,67	-2,79±0,68
8	0,750±0,011	0,01±0,02	63,0±9,7	-1,72±0,491	-1,72±0,49
9	1,511±0,294	0,01±0,02	39,9±6,5	-12,84±0,66	-2,84±0,66
10	0,639±0,131	0,01±0,01	49,4±12,2	-3,19±0,74	-3,20±0,73
11	0,390±0,082	-0,02±0,03	55,8±8,7	3,54±0,77	-3,52±0,77
12	0,659±0,146	0,01±0,02	42,4±3,6	-2,22±0,65	-2,23±0,65
<b>Середнє за рік</b>	<b>0,749±0,020</b>	<b>-0,01±0,01</b>	<b>41,0±2,5</b>	<b>-1,91±0,49</b>	<b>-1,91±0,49</b>

**Таблиця 9.** Результати гармонічного аналізу збурювальних нахилів земної поверхні і температури повітря на частоті припливної хвилі  $N_2$  (теоретична припливна амплітуда  $R_T=1,493$  mas) для напрямку NS

Місяці року	Збурювальні нахили		Температура повітря		Зсув фаз $\varphi=\Delta\varphi_{т}-\Delta\varphi_з$ , рад
	$R_з$ , mas	$\Delta\varphi_з$ , рад	$R_{т}$ , °C	$\Delta\varphi_{т}$ , рад	
1	0,700±0,086	0,01±0,10	0,02±0,01	-2,00±0,65	-2,01±0,65
2	0,471±0,065	0,02±0,25	0,03±0,01	-0,40±0,48	-0,42±0,54
3	0,385±0,103	0,11±0,16	0,03±0,01	-1,36±0,61	-1,47±0,63
4	0,319±0,125	0,02±0,06	0,02±0,01	0,78±0,50	0,76±0,51
5	0,672±0,039	0,15±0,11	0,02±0,01	-2,92±0,85	-3,07±0,86
6	0,382±0,050	-0,01±0,08	0,03±0,01	0,54±0,63	0,55±0,64
7	0,334±0,033	0,68±0,13	0,03±0,01	0,44±0,49	-0,24±0,51
8	0,600±0,051	-0,01±0,13	0,02±0,01	-1,04±0,61	-1,04±0,62
9	0,352±0,082	0,64±0,11	0,02±0,01	-0,30±0,63	0,94±0,64
10	0,496±0,124	0,15±0,08	0,02±0,01	-0,05±0,76	-0,20±0,63
11	0,250±0,082	0,11±0,08	0,02±0,01	0,21±0,76	0,10±0,76
12	0,233±0,035	0,40±0,20	0,02±0,01	1,52±0,30	1,12±0,36
<b>Середнє за рік</b>	<b>0,419±0,049</b>	<b>0,14±0,06</b>	<b>0,02±0,01</b>	<b>-0,16±0,39</b>	<b>-0,27±0,39</b>

частоту 0,5236 рад за годину та амплітуду на широті Полтави 3,63 mas. Ймовірно, що метеорологічні фактори можуть бути головною причиною збурень її припливних

параметрів. Опрацьовані за методикою, як і для інших хвиль, результати впливу температури та атмосферного тиску наведено у табл. 11 та 12 відповідно.

**Таблиця 10.** Результати гармонічного аналізу збурювальних нахилів земної поверхні і атмосферного тиску на частоті припливної хвилі  $N_2$  (теоретична припливна амплітуда  $R_T=1,493 \text{ mas}$ ) для напрямку NS

Місяці року	Збурювальні нахили		Атмосферний тиск		Зсув фаз $\varphi = \Delta\varphi_{\text{ат}} - \Delta\varphi_{\text{з}}$ , рад
	$R_{\text{з}}$ , mas	$\Delta\varphi_{\text{з}}$ , рад	$R_{\text{ат}}$ , $10^{-1}$ Па	$\Delta\varphi_{\text{ат}}$ , рад	
1	0,700±0,086	0,01±0,10	36,2±8,5	-2,64±0,65	-2,65±0,66
2	0,471±0,065	0,02±0,25	41,4±7,8	-3,20±0,68	-3,22±0,73
3	0,385±0,103	0,11±0,16	48,3±2,7	-3,54±0,48	-3,65±0,51
4	0,319±0,125	0,02±0,06	47,1±10,8	-1,91±0,64	-1,93±0,64
5	0,672±0,039	0,15±0,11	38,4±5,6	-2,98±0,68	-3,14±0,69
6	0,382±0,050	-0,01±0,08	37,3±7,4	-3,08±0,64	-3,070±0,64
7	0,334±0,033	0,68±0,13	32,9±6,0	-3,82±0,57	-4,51±0,58
8	0,600±0,051	-0,01±0,13	42,0±8,5	-3,87±0,62	-3,87±0,64
9	0,352±0,082	0,64±0,11	40,0±5,9	-2,22±0,46	-2,86±0,48
10	0,496±0,124	0,15±0,08	46,0±10,9	-3,06±0,62	-3,20±0,62
11	0,250±0,082	0,11±0,08	45,2±8,0	-2,47±0,46	-2,57±0,46
12	0,233±0,035	0,40±0,20	37,1±7,2	-3,54±0,50	-3,94±0,54
<b>Середнє за рік</b>	<b>0,419±0,049</b>	<b>0,14±0,06</b>	<b>42,2±1,6</b>	<b>-3,00±0,18</b>	<b>-3,13±0,20</b>

**Обговорення отриманих результатів.**

Рис. 1 свідчить, що між спостереженими нахиломірними та температурними рядами чітко виділяються добові складові, дуже подібні за формою, але помітно зсунуті за фазою. Так, максимум збурювальних нахилів земної поверхні постійно запізнюється відносно моменту температурного максимуму. Це свідчить про непрямий функціональний зв'язок між цими рядами.

Як бачимо, у табл. 2 найбільші амплітудні значення трапляються на частоті хвилі  $K_1$ , що суттєво перевищує середньоквадратичні помилки їх визначення, і спостерігаються у літню пору. Вони впродовж усіх років систематично перевищують теоретичну амплітуду цієї хвилі. Добові середньомісячні амплітуди повітря також найбільші у літню пору і сягають майже  $6 \text{ }^\circ\text{C}$  та виділяються з середньоквадратичною помилкою, що не перевищує 10 %. Аналогічні дані для хвилі  $O_1$  виявились, за винятком літніх місяців, незначними (близько 1—2 mas) і виділяються з помилками у межах 10 %. Середньомісячні амплітуди температури повітря у літню пору тут сягають лише  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  і виділяються у середньому з помилкою до 20 %. Середньо-

річна різниця зсуву фаз  $\varphi$  та середньорічний зсув фази температури повітря  $\Delta\varphi_{\text{п}}$  не визначаються. Отже, температура повітря на частоті припливної хвилі  $O_1$  не генерує збурювальних нахилів земної поверхні, але може мати безпосередній вплив на реєструючу нахиломірну апаратуру. Оскільки середньомісячні амплітуди збурень систематично перевищують припливні амплітуди більш ніж на 100 %, то постає питання, яким чинником вони викликані.

Цікавим фактом є наявність постійної різниці зсуву фаз  $\varphi$  між збурювальними нахилами земної поверхні і температурою повітря для хвилі  $K_1$ . Так, фази збурювальних нахилів для зимових місяців запізнюються на 3 години порівняно з одномоментними фазами температури повітря, а в інші періоди року — майже на 6 годин. Імовірно, це обумовлено наявністю чи відсутністю рослинного покриву та різними фізичними властивостями ґрунту у ці періоди року. Виявлена різниця зсуву фаз  $\varphi$  свідчить, що генеруючий збурювальні нахили шар ґрунту не є поверхневим, який безпосередньо контактує з повітрям, а знаходиться на певній глибині.

Середньорічні різниці (див. табл. 4) між

**Таблиця 11.** Результати гармонічного аналізу збурювальних нахилів земної поверхні і температури повітря на частоті припливної хвилі  $S_2$  (теоретична припливна амплітуда  $R_7=3,63 \text{ mas}$ ) для напрямку NS

Місяці року	Збурювальні нахили		Температура повітря		Зсув фаз $\varphi=\Delta\varphi_{\text{П}}-\Delta\varphi_3$ , рад
	$R_3$ , mas	$\Delta\varphi_3$ , рад	$R_{\text{П}}$ , °C	$\Delta\varphi_{\text{П}}$ , рад	
1	2,891±0,170	0,01±0,09	0,32±0,04	-0,92±0,13	-0,93±0,16
2	1,509±0,048	-0,18±0,06	0,35±0,03	0,91±0,11	1,09±0,13
3	1,415±0,508	-0,23±0,08	0,36±0,04	1,07±0,10	1,30±0,13
4	1,556±1,146	-0,02±0,01	0,42±0,03	0,68±0,13	0,70±0,12
5	1,587±0,169	-0,33±0,02	0,50±0,04	0,20±0,17	0,52±0,17
6	1,837±0,100	-0,11±0,16	0,45±0,03	0,25±0,22	0,35±0,28
7	1,558±0,064	-0,57±0,10	0,44±0,04	0,19±0,19	0,38±0,21
8	1,526±0,395	-0,60±0,02	0,50±0,03	-0,28±0,12	0,32±0,12
9	3,474±0,448	0,10±0,24	0,54±0,06	-0,85±0,08	-0,94±0,25
10	1,819±0,180	-0,05±0,12	0,58±0,05	-1,32±0,09	-1,27±0,15
11	0,987±0,385	-0,23±0,04	0,42±0,06	-1,24±0,11	-1,01±0,13
12	2,264±0,311	-0,08±0,03	0,25±0,04	-1,45±0,34	-1,37±0,33
<b>Середнє за рік</b>	<b>1,635±0,094</b>	<b>-0,02±0,02</b>	<b>0,42±0,02</b>	<b>-0,27±0,27</b>	<b>-0,22±0,30</b>

**Таблиця 12.** Результати гармонічного аналізу збурювальних нахилів земної поверхні і атмосферного тиску на частоті припливної хвилі  $S_2$  (теоретична припливна амплітуда  $R_7=3,63 \text{ mas}$ ) для напрямку NS

Місяці року	Збурювальні нахили		Атмосферний тиск		Зсув фаз $\varphi=\Delta\varphi_{\text{ат}}-\Delta\varphi_3$ , рад
	$R_3$ , mas	$\Delta\varphi_3$ , рад	$R_{\text{ат}}$ , $10^2\text{Па}$	$\Delta\varphi_{\text{ат}}$ , рад	
1	2,891±0,170	0,01±0,09	0,214±0,012	-1,96±0,07	-1,97±0,12
2	1,509±0,048	-0,18±0,06	0,184±0,011	-2,06±0,04	-1,87±0,07
3	1,415±0,508	-0,23±0,08	0,208±0,011	-2,26±0,07	-2,03±0,10
4	1,556±1,146	-0,02±0,01	0,259±0,016	-2,52±0,04	-2,36±0,06
5	1,587±0,169	-0,33±0,02	0,307±0,009	-2,33±0,06	-2,13±0,05
6	1,837±0,100	-0,11±0,16	0,314±0,018	-2,16±0,10	-2,22±0,17
7	1,558±0,064	-0,57±0,10	0,253±0,020	-2,15±0,10	-1,59±0,14
8	1,526±0,395	-0,60±0,02	0,197±0,011	-2,02±0,04	-1,42±0,04
9	3,474±0,448	0,10±0,24	0,199±0,011	-2,21±0,07	-2,31±0,25
10	1,819±0,180	-0,05±0,12	0,213±0,012	-2,42±0,04	-2,37±0,13
11	0,987±0,385	-0,23±0,04	0,207±0,010	-2,48±0,04	-2,25±0,06
12	2,264±0,311	-0,08±0,03	0,221±0,009	-2,17±0,10	-2,09±0,10
<b>Середнє за рік</b>	<b>1,635±0,094</b>	<b>-0,20±0,02</b>	<b>0,225±0,012</b>	<b>-2,27±0,02</b>	<b>-2,24±0,06</b>

спостереженими і вирахованими збурювальними параметрами як за амплітудою, так і за фазою практично відсутні, а щомісячні різниці за амплітудою не перевищують 2 mas, мають знаковміний характер

і знаходяться у межах середньоквадратичних помилок визначення. Щомісячні різниці фаз мають також знаковміний характер, знаходяться у межах середньоквадратичних помилок та не перевищують

0,08 рад. Тому реальні ряди нахиломірних спостережень, опрацьовані за пропонованою методикою, практично можуть бути звільнені від систематичних температурних збурень.

Отже, існує реальна можливість на основі теорії термопружних деформацій земної поверхні підвищити точність і достовірність нахиломірних параметрів, але при цьому потрібно мати додаткову одномоментну інформацію про температурне поле у затінених та освітлених ділянках ґрунту в околі нахиломірної станції, розмір ймовірної температурної хвилі та вологість ґрунту. Зауважимо, що отримані різниці параметрів хвилі  $K_1$  не претендують на належну достовірність, оскільки вони отримані шляхом моделювання та залучення неодномоментних реальних даних температурного поля в околі нахиломірної станції. Вони лише свідчать про можливість і необхідність удосконалення методики нахиломірних спостережень з метою отримання надійної геофізичної інформації.

Результати гармонічного аналізу температури повітря та ґрунту на глибині 0,5 м для припливної хвилі  $K_1$  (див. табл. 1) свідчать про реальне запізнення на цих глибинах моментів максимумів добової температури на 3 і 6 годин відносно аналогічних значень температури повітря та про зменшення амплітуди у 2 рази зі збільшенням глибини ґрунту на кожні 0,1 м, що відповідає закону Фур'є, незважаючи на значний проміжок часу.

Як бачимо, амплітуди атмосферного тиску для хвилі  $K_1$  (див. табл. 5) знаходяться у межах  $(0,2—0,3) \cdot 10^2$  Па та виділяються з помилками близько 20 %. Для хвилі  $O_1$  (див. табл. 6) ці амплітуди у літній період майже вдвічі менші від інших пір року та виділяються також з помилками порядку 20 %. Помилки середньорічних значень барометричних амплітуд не перевищують 10 %. Помісячні зсуви фаз  $\Delta\varphi$  для хвиль  $K_1$  і  $O_1$  є від'ємними та у межах середньоквадратичних помилок близькі до 3,14 рад. Щомісячні амплітуди збурювальних нахилів на частоті хвилі  $O_1$  знаходяться у межах 0,5—2,5 mas і виділяються з помилками

близько 10 %. Середньорічна амплітуда збурювальних нахилів сягає 100 % її теоретичного значення. Різниця зсувів фаз  $\chi$  для обох цих хвиль є від'ємною і у межах помилок близька до 3,14 рад. Це свідчить, що атмосферний тиск зменшує лише амплітуди нахилів земної поверхні на частотах припливних хвиль  $O_1$  і  $K_1$ , оскільки ці фактори мають протилежні фази. На жаль, достовірного функціонального зв'язку між впливом атмосферного тиску на параметри припливних хвиль на сьогодні ще не встановлено. Існує припущення, що цей вплив може сягати 0,3—0,5 % теоретичних амплітуд головних припливних хвиль [Павлык и др., 1988].

Щомісячні збурювальні нахили хвилі  $M_2$  (див. табл. 7) знаходяться у межах 0,4—1,5 mas і виділяються з помилками близько 10 %. Середньорічне значення амплітуди становить  $0,749 \pm 0,020$  mas, що сягає 10 % її теоретичного значення. Зсуви помісячних фаз збурювальних нахилів є знакозмінними і в середньому близькі до нуля. Щомісячні амплітуди температури повітря для цієї хвилі не перевищують  $0,9$  °C і виділяються з помилками близько 10 %. Температурні помісячні зсуви фаз мають знакозмінний характер, а середньорічне їх значення  $\Delta\varphi$  і різниці фаз  $\chi$  у межах помилок близькі до нуля.

Помісячні амплітуди атмосферного тиску на частоті цієї хвилі (див. табл. 8) виділяються з помилками не гірше 10 %, а середньорічне її значення становить  $(41,0 \pm 2,5) \cdot 10^{-1}$  Па. Помісячні зсуви фаз  $\Delta\varphi$  є від'ємними і рівними  $1,91 \pm 0,49$  рад. Ці дані та значення параметра  $\chi$  переконливо свідчать про вплив атмосферного тиску як на амплітуду, так і на фазу цієї хвилі. На жаль, про цей вплив наразі можемо судити тільки якісно.

Для хвилі  $N_2$  (див. табл. 9) щомісячні амплітуди і зсуви фаз збурювальних нахилів земної поверхні є доволі стабільними, а середньорічне їх значення за амплітудою дорівнює  $0,419 \pm 0,049$  mas, що сягає 35 % її теоретичного значення, та  $0,14 \pm 0,06$  рад для зсуву фази  $\Delta\varphi$ . Щомісячні амплітуди та зсуви фаз температури повітря прак-

тично не виділяються, а атмосферний тиск (див. табл. 10) знаходиться у межах  $(35\text{—}45)\cdot 10^{-1}$  Па. Середньорічне його значення становить  $(42,2\pm 1,6)\cdot 10^{-1}$  Па, а зсув фази  $\Delta\varphi$  і різниця зсувів фаз між атмосферним тиском і збурювальними нахилами  $\zeta$  від'ємні та близькі до 3,14 рад. Ці дані свідчать про те, що вплив атмосферного тиску може лише зменшувати її реальну амплітуду. Середньорічне значення збурювальних нахилів земної поверхні на частоті хвилі  $N_2$  має систематичний характер і становить приблизно 30 %. Це досить суттєве збурення і воно, як бачимо, не може бути згенероване метеорологічними чинниками.

Щомісячні збурювальні нахили на частоті хвилі  $S_2$  (див. табл. 11) знаходяться у межах  $1\text{—}3$  mas і виділяються з помилками близько 10 %. Середньорічне значення амплітуди становить  $1,635\pm 0,094$  mas, що сягає 50 % її теоретичного значення.

Зсуви помісячних фаз збурювальних нахилів є знаковмінними і в середньому близькі до нуля. Щомісячні амплітуди температури повітря не перевищують  $0,6$  °C і виділяються з помилками близько 10 %. Температурні помісячні зсуви фаз мають знаковмінний характер, а середньорічне їх значення  $\Delta\varphi$  і різниці фаз  $\zeta$  у межах помилок близькі до нуля. Помісячні амплітуди атмосферного тиску (див. табл. 12) на частоті цієї хвилі виділяються з помилками не гірше 10 %, а середньорічне її значення становить  $(0,225\pm 0,012)\cdot 10^{-1}$  Па. Помісячні зсуви фаз  $\Delta\varphi$  виявились рівними  $-2,27\pm 0,02$  рад. Ці дані та значення параметра  $\zeta$  переконливо свідчать про вплив атмосферного тиску як на амплітуду, так і на фазу цієї хвилі. На жаль, про цей вплив наразі можемо судити тільки якісно. Таким чином, метеорологічні фактори, за винятком хвиль  $K_1$  і  $S_2$ , практично не впливають на амплітуди добових і півдобових припливних хвиль.

На наш погляд, ймовірною причиною виявлених систематичних збурень параметрів головних припливних хвиль можуть бути аномальні деформації нахиломірного постаменту, зумовлені неоднаковими модулями жорсткості в зоні його контакту з

грунтом камери. Детальні обстеження виявили, що основа постаменту заглиблена у ґрунт лише на 0,2 м, а центр його ваги знаходиться на висоті понад 0,5 м. Його бокові стінки не зв'язані жорстко з ґрунтом. Крім того, іншим збурюючим фактором, що суттєво впливає на параметри припливних хвиль, є ефект порожнини [Harrison, 1976], оскільки постамент знаходиться поблизу північної стіни камери.

За цих умов під дією тяжіння Місяця і Сонця виникатимуть його аномальні нахили, що збільшують амплітуди припливних хвиль.

Зауважимо, що слід відрізнити аномальні припливні нахили від збурювальних нахилів метеорологічного походження. Так, для хвилі  $M_2$ , амплітуда якої становить  $7,8$  mas, фактор  $\gamma$  за даними спостережень уздовж профілю Київ—Бахмут і свердловинного нахиломіра поблизу полтавської камери у напрямку NS менший порівняно з напрямком EW на 0,040. Із 11-річних рядів спостережень для цієї хвилі у напрямку NS фактор  $\gamma$  виявився, навпаки, більшим на 0,080, що становить лише 0,62 mas. Проте температурні збурювальні нахили постаменту у літню пору для хвилі  $K_1$  сягають 30 mas, тому припливні нахили є значно меншими і не можуть суттєво ускладнювати доцільність застосування математичної теорії термопружних деформацій В. Попова.

У земноприпливній практиці дослідження впливу конструкції постаменту на результати нахиломірних спостережень не виконувались. Автори спостережень припливних нахилів земної поверхні вздовж профілів Суми—Херсон та Київ—Бахмут [Матвеев и др., 1977; Баленко, 1980] закладали бетонні постаменти, які жорстко зв'язані з ґрунтом на глибину близько 1 м, а висота робочої поверхні над підлогою камери становила 0,1—0,2 м. В отриманих результатах параметрів головних припливних хвиль не виявлено таких систематичних аномальних збурень.

**Висновки.** На полігоні у Полтаві, де в камері на глибині 5 м виконані 11-річні ряди нахиломірних спостережень, шляхом

детального аналізу експериментальних даних у напрямку NS виявлено значні систематичні збурення параметрів головних припливних хвиль, що мають важливе геофізичне значення. Так, фактична амплітуда хвилі  $K_1$  в літні місяці збільшена майже у 30 разів відносно її теоретичного припливного аналога.

Виявлено фазове запізнення добових збурювальних нахилів земної поверхні відносно температури повітря, яке у січні—березні становить 3 години, а у квітні—грудні — 6 годин. Це свідчить про те, що температура повітря не безпосередньо, а опосередковано генерує збурювальні нахили земної поверхні.

Встановлено, що причиною систематичних збурень параметрів припливних хвиль є деформаційні процеси шару ґрунту на глибині 0,10—0,25 м, зумовлені локальними, ендегенними та екзогенними факторами, серед яких основну роль відіграють нестабільність температурного поля, вологість ґрунту та довжина температурних хвиль в околі нахиломірного пункту.

Показано можливість, залучаючи теорію термопружних деформацій земної поверхні, фізичні властивості ґрунту та параметри температурного поля в околі нахиломірного пункту, очистити параметри добових припливних хвиль від систематичних температурних збурень з метою підвищення їх достовірності. Так, у напрямку NS для хвилі  $K_1$  різниця амплітуд і зсувів фаз між спостереженими температурними збурювальними нахилами та обчисленими на основі теорії термопружних деформацій В. Попова виявилась у середньорічному вимірі практично відсутньою. Ці результати переконливо свідчать про реальну можливість і необхідність очищення спостережених даних від систематичного збурювального впливу температурного походження для отримання достовірної геофізичної інформації. Якщо навіть за таких змодельованих умов вилучити з нахиломірних спостережень обчислені температурні збурення, то отриманий при цьому амплітудний фактор  $\gamma$  для хвилі  $M_2$  суттєво наближається до аналогічного регіональ-

ного, отриманого для території України.

Фізичні властивості ґрунту, такі як коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт температурного розширення, вологість, коефіцієнт Пуассона, залежать від пори року. Розрахунки показують, що їх сезонні зміни суттєво впливають на кінцеві результати. Тому необхідно паралельно з нахиломірними виконувати спостереження за величиною та зміною у часі параметрів фізичних властивостей ґрунту в околі нахиломірного пункту.

Отримана з багаторічних спостережень різниця зсуву фаз між збурювальними нахилами та атмосферним тиском свідчить про те, що він незначною мірою може впливати лише на амплітуди хвиль  $K_1$  і  $S_2$  і становить не більше 2 % від їх теоретичного значення.

Хвиля  $O_1$  має місяцеве походження і її частота вигідно відрізняється від частот метеорологічних факторів, що сприяє незначному збуренню її припливної амплітуди. Виявлені помісячні зсуви фаз збурювальних нахилів і температури повітря практично збігаються, що свідчить про можливий безпосередній вплив температури повітря на нахиломірну апаратуру. Середньорічна амплітуда температури повітря на частоті хвилі  $O_1$  визначається з помилкою менше ніж 10 % і становить 0,29 °С. Вплив атмосферного тиску систематично зменшує припливну амплітуду цієї хвилі, оскільки виявлена різниця зсуву фаз між збурювальними нахилами і атмосферним тиском є близькою до 3,14 рад. Середньорічна амплітуда збурювальних нахилів на частоті хвилі  $O_1$  сягає 100 % від її теоретичного припливного значення.

Півдобові хвилі  $M_2$  і  $N_2$  мають місяцеве походження і температура повітря може лише безпосередньо впливати на їх припливні параметри, оскільки різниці фаз між збурювальними нахилами і температурою повітря близькі до нуля. Вплив атмосферного тиску на хвилю  $M_2$  незначний, але систематично зменшує її амплітуду та впливає на фазовий зсув  $\Delta\phi$ . Середньорічна амплітуда збурювальних нахилів на частоті цієї хвилі сягає 10 % від її теоретич-

ного значення. Вплив атмосферного тиску на хвилю  $N_2$  також незначний і зменшує лише її амплітуду. Середньорічне збурення припливних нахилів на частоті цієї хвилі сягає 30 %.

Хвиля  $S_2$  сонячного походження, але виявлена різниця зсуву фаз між збурювальними нахилами і температурою повітря у середньорічному вимірі виявилась близькою до нуля. Це свідчить про можливий безпосередній температурний вплив на припливореєструючу апаратуру. Помісячні різниці зсувів фаз між збурювальними нахилами і атмосферним тиском носять систематичний характер і у середньорічному вимірі становлять  $-2,24 \pm 0,06$  рад. Помісячні амплітуди атмосферного тиску виділяються з помилкою менше 10 %, а середньорічне їх значення становить  $(0,225 \pm 0,012) \cdot 10^2$  Па. Отримані результати переконливо свідчать про вплив атмосферного тиску як на амплітуду, так і на фазу хвилі  $S_2$ .

Для підвищення точності та достовірності параметрів добових і півдобових припливних хвиль необхідно вести додаткові одномоментні спостереження за температурним полем ґрунту на глибині 0,2 м, його фізичними властивостями та атмосферним тиском в околі нахиломірного пункту. Без усунення систематичних метеорологічних збурень параметри добових і півдобових припливних хвиль мало придатні для визначення резонансного ефекту рідкого ядра Землі та чисел Лява, які з іншими фізичними даними сприяють вибору найбільш достовірної моделі її будови.

Ймовірною причиною аномальних збурень амплітуд припливних хвиль є неналежна конструкція нахиломірного постаменту, відсутність жорсткого контакту його з ґрунтом камери та ефект порожнини, оскільки постамент знаходиться поблизу північної стіни камери, що суттєво впливає на результати параметрів припливних хвиль.

### Список літератури

- Аксентьева З.Н., Булацен В.Г., Токарь В.И. О переработке 11-летнего ряда наблюдений (1930—1941 гг.) над колебаниями отвеса в Полтаве. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1970. № 2. С. 3—8.
- Анохина К.М., Широков И.А. Некоторые результаты наблюдений периодических тепловых наклонов земной поверхности. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1974. № 6. С. 82—88.
- Багмет А.Л., Кутный А.М. Эталонирование наклономеров с фотоэлектрическим увеличением на малых углах наклона. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1973. № 5. С. 46—50.
- Баленко В.Г. *Исследование наклонов земной поверхности по профилю Киев—Артемовск*. Киев: Наук. думка, 1980, 173 с.
- Баленко В.Г., Кутный А.М., Новикова А.Н. Результаты наблюдений приливных наклонов на станции «Березовая Рудка». *Вращение и приливные деформации Земли*. 1978. № 10. С. 14—22.
- Баленко В.Г., Кутный А.М., Новикова А.Н. Результаты наблюдений приливных наклонов на станции «Катериновка». *Вращение и приливные деформации Земли*. 1972. № 4. С. 65—75.
- Баленко В.Г., Кутный А.М., Новикова А.Н. Результаты наблюдений приливных наклонов на станции «Покровская Багачка». *Вращение и приливные деформации Земли*. 1975. № 7. С. 15—21.
- Баленко В.Г., Кутный А.М., Новикова А.Н. Результаты наблюдений приливных наклонов на станции «Шевченково» Карловского района Полтавской области. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1970. № 2. С. 41—56.
- Булацен В.Г., Богдан И.Ю. О влиянии суточной метеорологической волны  $S_1$  на результаты гармонического анализа 11-летнего (1930—1941 гг.) ряда наклономерных наблюдений в Полтаве. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1978. № 10. С. 48—51.
- Голубицкий В.Г., Матвеев П.С., Богдан И.Ю.,

- Кривонос А.Л., Славинская Е.А. Результаты гармонического анализа наклономерных наблюдений на пункте «Перегоновка» за 1974—1978 гг. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1982. № 14. С. 23—31.
- Голубицкий В.Г., Матвеев П.С., Богдан И.Ю., Славинская Е.А. Результаты гармонического анализа наклономерных наблюдений в Христофоровке. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1977. № 9. С. 3—12.
- Гриднев Д.Г. Эталонирование гравиметров фирмы «Аскания» и определение масштаба записи приливных изменений силы тяжести наклоном. Температурные наклоны постаментов. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1975. № 6. С. 42—53.
- Кутний А.М., Бабич Т.М. Підвищення точності визначення резонансного впливу рідкого ядра Землі на земні припливи. *Геофиз. журн.* 2010. Т. 32. № 3. С. 140—142. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i3.2010.117548>.
- Кутний А.М., Булацен В.Г., Бродский Б.И., Состин А.А. Сквжинный экстензометр Полтавской гравиметрической обсерватории. В кн.: *Вращение и деформации Земли*. Киев: Наук. думка, 1992, С. 97—104.
- Кутний А.М., Павлик В.Г., Бабич Т.М. Моделювання та роздільне виключення збурень земноприливних спостережень. *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 2. С. 157—162. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i2.2013.111359>.
- Кутний А.М., Павлик В.Г., Булацен В.Г., Голубицкий В.Г., Богдан И.Ю., Корба П.С., Бабич Т.М., Плис В.П. Результаты та анализ земноприливных спостережень на території України. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 2. С. 56—72. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i2.2015.111305>.
- Матвеев П.С., Богдан И.Ю., Дубик Б.С., Славинская Е.А. Результаты гармонического анализа наклономерных наблюдений в Самогеевке и Лиховке. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1971. № 3. С. 39—52.
- Матвеев П.С., Голубицкий В.Г., Богдан И.Ю., Дубик Б.С., Славинская Е.А. Уточненные значения параметров земного прилива для пунктов наклономерного профиля Сумы—Херсон. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1977. № 9. С. 16—33.
- Матвеев П.С., Голубицкий В.Г., Дубик Б.С., Славинская Е.А. Результаты гармонического анализа наклономерных наблюдений в Мураховке. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1974. № 6. С. 28—36.
- Матвеев П.С., Островский А.Е., Голубицкий В.Г., Богдан И.Ю., Дубик Б.С., Славинская Е.А., Результаты гармонического анализа наклономерных наблюдений на станции «Судиевка» за 1971—1973 гг. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1975. № 7. С. 3—9.
- Метеопост. Архів метеоданих. (2024). Режим доступу: <https://meteopost.com/weather/archive/> (дата звернення 10.02.2024).
- Павлык В.Г., Баленко В.Г., Кутний А.М., Новикова А.Н. Некоторые вопросы теплового и гравитационного приливов в атмосфере. В сб.: *Изучение Земли как планеты методами геофизики, геодезии и астрономии: труды II Орловской конференции*. Киев: Наук. думка, 1988, С. 174—176.
- Широков И.А., Анохина К.М. Локальные температурные наклоны земной поверхности. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1975. № 7. С. 32—38.
- Albano, A., Corrado, G., Gervasi, A., Guerra, I. (2015). Continuous gravity and tilt observations in an active geodynamic area of southern Italy: the Calabrian Arc system. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 56(1), 1—18. <https://doi.org/10.4430/bgta0133>.
- Bán, D., Mentés, G., Kis, M., & Koppán, A. (2018). Observation of the Earth Liquid Core Resonance by Extensometers. *Pure and Applied Geophysics*, 175(4), 1631—1642. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1724-6>.
- Braitenberg, C. (2018). The deforming and rotating Earth — A review of the 18th International Symposium on Geodynamics and Earth Tide, Trieste 2016. *Geodesy and Geodynamics*, 9(3), 187—196. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.03.003>.
- Cui, X., Sun, H., Xu, J., Zhou, J., & Chen, X. (2018). Detection of free core nutation resonance variation in Earth tide from global superconduct-

- ing gravimeter observations. *Earth, Planets and Space*, 70, 199. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0971-9>.
- Harrison, J.C. (1976). Cavity and topographic effects in tilt and strain measurement. *Journal of Geophysical Research*, 81(2), 319—328. <https://doi.org/10.1029/JB081i002p00319>.
- Jobert, G. (1960). Perturbations des marées terrestres. *Annales Geophysicae*, 16, 1—55.
- Lyard, L., Lefevre, L., Letellier, T., & Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56, 394—415. <https://doi.org/10.1007/s10236-006-0086-x>.
- Mathews, P.M., Buffett, B.A., & Shapiro, I.I. (1995). Love numbers for diurnal tides: Relation to wobble admittances and resonance expansions. *Journal of Geophysical Research*, 100, 9935—9948. <https://doi.org/10.1029/95JB00670>.
- Melchior, P. (1966). *The Earth tides*. Pergamon Press, 458 p.
- Nakano, S. (1963). The effect of surface temperature on the crustal deformations. *Bulletins of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, 60, 6—15.
- Peltier, A., Beauducel, F., Staudacher, T., Catherine, Ph., & Kowalski, Ph. (2016). Contribution of tiltmeters and extensometers to monitor piton de la fournaise activity. In P. Bachelery, J.F. Lenat, A. Di Muro, L. Michon (Eds.), *Active Volcanoes of the Southwest Indian Ocean* (pp. 287—303). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-31395-0\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-642-31395-0_17).
- Petrosino, S., Ricco, C., De Lauro, E., Aquino, I., & Falanga, M. (2020). Time evolution of medium and long-period ground tilting at Campi Flegrei caldera. *Advances in Geosciences*, 52, 9—17. <https://doi.org/10.5194/adgeo-52-9-2020>.
- Schueller, K. (2015). Theoretical basis for Earth Tide analysis with the new ETERNA34-ANAV4.0 program. *Marees Terrestres Bulletin d'Informations*, 149, 12024—12061.
- Schwiderski, E.W. (1980). On charting Global Ocean Tides. *Reviews of Geophysics*, 18(1), 243—268. <https://doi.org/10.1029/RG018i001p00243>.
- Sun, H., Braitenberg, C., Feng, W., & Cui, X. (2023). A review of the 19th International Symposium on geodynamics and earth tide, Wuhan 2021. *Geodesy and Geodynamics*, 14(1), 4—14. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.11.003>.
- Varga, P., & Grafarend, E. (2018). Influence of Tidal Forces on the Triggering of Seismic Events. *Pure and Applied Geophysics*, 175(1), 1649—1657. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1563-5>.
- Venedikov, A.P. (1966). Une methode pour l'analyse des marées terrestres a partir d'enregistrements de longueur arbitraire. *Bulletins de l'Académie Royale de Belgique*, 52, 463—485.
- Wahr, J.M. (1981). Body tides on an elliptical, rotating, elastic, and oceanless Earth. *Geophysical Journal International*, 64(3), 677—703. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1981.tb02690.x>.
- Wenzel, H.G. (1996). The Nanogal Software: Earth Tide Data Processing Package: ETERNA 3.3. *Marees Terrestres Bulletin d'Informations*, 124, 9425—9439.

## Study of the influence of meteorological factors on the parameters of the main tidal waves in the NS direction

A.M. Kutnyi<sup>1</sup>, V.G. Pavlyk<sup>1</sup>, B.A. Kutnyi<sup>2</sup>, T.M. Babych<sup>1</sup>, 2026

<sup>1</sup>Poltava Gravimetric Observatory of S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Poltava, Ukraine

<sup>2</sup>National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

In order to identify the influence of meteorological factors on the parameters of the main tidal waves of tilt, which have important geophysical significance, hourly series of 11-year tiltmeter observations in Poltava for the NS direction and similar 10-year series of air temperature and atmospheric pressure were processed by tidal harmonic analysis. Significant systematic disturbances of the parameters of the main tidal waves and the phase delay of the daily disturbing tilt of the ground in relation to the air temperature were revealed, which in January—March is 3 hours, and in May—December — 6 hours. It was established that the causes of systematic disturbances of the tidal parameters are deformation processes of the soil layer at a depth of 0.10—0.25 m, which are caused by local exogenous and endogenous factors, among which the main role is played by the instability of the thermal field, soil moisture and the length of thermal waves in the vicinity of the tiltmeter point. The possibility of freeing the parameters of daily tidal waves from systematic temperature disturbances by involving the theory of thermoelastic deformations, physical properties of the soil, and temperature field parameters is shown. Thus, for the  $K_1$  wave, the difference in amplitudes and phase shifts between the temperature perturbing tilts obtained from observations and those calculated on the basis of the theory of thermoelastic deformations turned out to be practically absent in the average annual measurement. This convincingly indicates the possibility and necessity of cleaning the observed data from the systematic influence of temperature disturbances in order to obtain reliable geophysical information. It was established that atmospheric pressure practically does not affect the parameters of semidiurnal and diurnal tidal waves of lunar origin. The obtained results convincingly indicate the influence of atmospheric pressure on both the amplitude and the phase of the tidal wave of solar origin  $S_2$ .

**Key words:** earth tides, tiltmeter observations, temperature and barometric observations, tidal harmonic analysis, thermoelastic deformations, reliable geophysical information.

### References

- Aksentyeva, Z.N., Bulatsen, V.G., & Tokar, V.I. (1970). On the processing of an 11-year series of observations (1930-1941) of the plumb line fluctuations in Poltava. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (2), 3—8 (in Russian).
- Anokhina, K.M., & Shirokov, I.A. (1974). Some results of observations of periodic thermal tilts of the earth's surface. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (6), 82—88 (in Russian).
- Bagmet, A.L., & Kutnyi, A.M. (1973). Standardization of tiltmeters with photoelectric magnification at small tilt angles. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (5), 46—50 (in Russian).
- Balenko, V.G. (1980). *Study of the slopes of the earth's surface along the Kyiv-Artemovsk profile*. Kiev: Naukova Dumka, 173 p. (in Russian).
- Balenko, V.G., Kutnyi, A.M., & Novikova, A.N. (1978). Results of observations of tidal tilts at the Berezovaya Rudka station. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (10), 14—22 (in Russian).
- Balenko, V.G., Kutnyi, A.M., & Novikova, A.N.

- (1972). Results of observations of tidal tilts at the Katerinovka station. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (4), 65—75 (in Russian).
- Balenko, V.G., Kutnyi, A.M., & Novikova, A.N. (1975). Results of observations of tidal tilts at the Pokrovskaya Bagachka station. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (7), 15—21 (in Russian).
- Balenko, V.G., Kutnyi, A.M., & Novikova, A.N. (1970). Results of observations of tidal tilts at the Shevchenkovo station, Karlovka district, Poltava region. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (2), 41—56 (in Russian).
- Bulatsen, V.G., & Bogdan, I.Yu. (1978). On the influence of the daily meteorological wave  $S_1$  on the results of the harmonic analysis of an 11-year (1930—1941) series of tiltmeter observations in Poltava. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (10), 48—51 (in Russian).
- Golubitskiy, V.G., Matveev, P.S., Bogdan, I.Yu., Krivonos, A.L., & Slavinskaya, E.A. (1982). Results of harmonic analysis of tiltmeter observations at the Peregonovka station for 1974—1978. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (14), 23—31 (in Russian).
- Golubitskiy, V.G., Matveev, P.S., Bogdan, I.Yu., & Slavinskaya, E.A. (1977). Results of harmonic analysis of tiltmeter observations in Khristoforovka. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (9), 3—12 (in Russian).
- Gridnev, D.G. (1975). Standardization of Askania gravimeters and determination of the scale of recording tidal changes in gravity by tilt. Temperature tilts of pedestals. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (6), 42—53 (in Russian).
- Kutnyi, A.M., & Babich, T.M. (2010). Accuracy increase of determination of resonance effect of liquid core of the Earth on the earth's tides. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 32(3), 140—142. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i3.2010.117548> (in Ukrainian).
- Kutnyi, A.M., Bulatsen, V.G., Brodskiy, B.I., & Sostin, A.A. (1992). Borehole extensometer of the Poltava gravimetric observatory. In *Rotation and deformation of the Earth* (pp. 97—104). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Kutnyi, A.M., Pavlyk, V.G., & Babych, T.M. (2013). Modeling and separate elimination of disturbances in tidal observations. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 35(2), 157—162. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i2.2013.111359> (in Ukrainian).
- Kutnyi, A.M., Pavlyk, V.G., Bulacen, V.G., Golubitskiy, V.G., Bohdan, I.Yu., Korba, P.S., Babych, T.M., & Plys, V.P. (2015). Results and analysis of tidal observations in the territory of Ukraine. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 37(2), 56—72. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i2.2015.111305> (in Ukrainian).
- Matveev, P.S., Bohdan, I.Yu., Dubyk, B.S., & Slavynskaya, E.A. (1971). The results of the harmonic analysis of inclinometers observed in Samotoevka and Lykhovka. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (3), 39—52 (in Russian).
- Matveev, P.S., Golubitskiy, V.G., Bohdan, I.Yu., Dubyk, B.S., & Slavynskaya, E.A. (1977). Refined values of earth's tide parameters for stations of the Sumy-Kherson tiltmeter profile. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (9), 16—33 (in Russian).
- Matveev, P.S., Golubitskiy, V.G., Dubyk, B.S., & Slavynskaya, E.A. (1974). Results of the harmonic analysis of tiltmeters observed in Murakhovka. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (6), 28—36 (in Russian).
- Matveev, P.S., Ostrovskiy, A.E., Golubitskiy, V.G., Bohdan, I.Yu., Dubyk, B.S., & Slavynskaya, E.A. (1975). Results of harmonic analysis of tiltmeters observed at the Sudiivka station for 1971—1973. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (7), 3—9 (in Russian).
- Meteopost. Weather data archive. (2024). Retrieved from <https://meteopost.com/weather/archive/>.
- Pavlyk, V.G., Balenko, V.G., Kutnyi, A.M., & Novikova, A.N. (1988). Some issues of thermal and gravitational tides in the atmosphere. In *Study of the Earth as a planet by methods of geophysics, geodesy and astronomy: Proceedings of the II Orlov Conference* (pp. 174—176). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Shirokov, I.A., & Anokhina, K.M. (1975). Local temperature slopes of the earth's surface. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (7), 32—38 (in Russian).

- Albano, A., Corrado, G., Gervasi, A., Guerra, I. (2015). Continuous gravity and tilt observations in an active geodynamic area of southern Italy: the Calabrian Arc system. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 56(1), 1—18. <https://doi.org/10.4430/bgta0133>.
- Bán, D., Mentés, G., Kis, M., & Koppán, A. (2018). Observation of the Earth Liquid Core Resonance by Extensometers. *Pure and Applied Geophysics*, 175(4), 1631—1642. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1724-6>.
- Braitenberg, C. (2018). The deforming and rotating Earth — A review of the 18th International Symposium on Geodynamics and Earth Tide, Trieste 2016. *Geodesy and Geodynamics*, 9(3), 187—196. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.03.003>.
- Cui, X., Sun, H., Xu, J., Zhou, J., & Chen, X. (2018). Detection of free core nutation resonance variation in Earth tide from global superconducting gravimeter observations. *Earth, Planets and Space*, 70, 199. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0971-9>.
- Harrison, J.C. (1976). Cavity and topographic effects in tilt and strain measurement. *Journal of Geophysical Research*, 81(2), 319—328. <https://doi.org/10.1029/JB081i002p00319>.
- Jobert, G. (1960). Perturbations des marées terrestres. *Annales Geophysicae*, 16, 1—55.
- Lyard, L., Lefevre, L., Letellier, T., & Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56, 394—415. <https://doi.org/10.1007/s10236-006-0086-x>.
- Mathews, P.M., Buffett, B.A., & Shapiro, I.I. (1995). Love numbers for diurnal tides: Relation to wobble admittances and resonance expansions. *Journal of Geophysical Research*, 100, 9935—9948. <https://doi.org/10.1029/95JB00670>.
- Melchior, P. (1966). *The Earth tides*. Pergamon Press, 458 p.
- Nakano, S. (1963). The effect of surface temperature on the crustal deformations. *Bulletins of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, 60, 6—15.
- Peltier, A., Beauducel, F., Staudacher, T., Catherine, Ph., & Kowalski, Ph. (2016). Contribution of tiltmeters and extensometers to monitor piton de la fournaise activity. In P. Bachelery, J.F. Lenat, A. Di Muro, L. Michon (Eds.), *Active Volcanoes of the Southwest Indian Ocean* (pp. 287—303). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-31395-0\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-642-31395-0_17).
- Petrosino, S., Ricco, C., De Lauro, E., Aquino, I., & Falanga, M. (2020). Time evolution of medium and long-period ground tilting at Campi Flegrei caldera. *Advances in Geosciences*, 52, 9—17. <https://doi.org/10.5194/adgeo-52-9-2020>.
- Schueller, K. (2015). Theoretical basis for Earth Tide analysis with the new ETERNA34-ANAV4.0 program. *Marees Terrestres Bulletin d'Informations*, 149, 12024—12061.
- Schwiderski, E.W. (1980). On charting Global Ocean Tides. *Reviews of Geophysics*, 18(1), 243—268. <https://doi.org/10.1029/RG018i001p00243>.
- Sun, H., Braitenberg, C., Feng, W., & Cui, X. (2023). A review of the 19th International Symposium on geodynamics and earth tide, Wuhan 2021. *Geodesy and Geodynamics*, 14(1), 4—14. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.11.003>.
- Varga, P., & Grafarend, E. (2018). Influence of Tidal Forces on the Triggering of Seismic Events. *Pure and Applied Geophysics*, 175(1), 1649—1657. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1563-5>.
- Venedikov, A.P. (1966). Une methode pour l'analyse des marées terrestres a partir d'enregistrements de longueur arbitraire. *Bulletins de l'Académie Royale de Belgique*, 52, 463—485.
- Wahr, J.M. (1981). Body tides on an elliptical, rotating, elastic, and oceanless Earth. *Geophysical Journal International*, 64(3), 677—703. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1981.tb02690.x>.
- Wenzel, H.G. (1996). The Nanogal Software: Earth Tide Data Processing Package: ETERNA 3.3. *Marees Terrestres Bulletin d'Informations*, 124, 9425—9439.