

Динаміка припливних параметрів залежно від обвалонебезпечного стану покрівлі соляної шахти

А.М. Кутний, В.Г. Павлик, Т.М. Бабич, В.П. Плис, 2023

Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики
ім. С.І. Субботіна НАН України, Полтава, Україна
Надійшла 8 листопада 2022 р.

Досліджено динаміку припливних параметрів за результатами нахиломірних спостережень у 4 пунктах обвалонебезпечної зони, яка утворилась над відпрацьованим полем соляної шахти в м. Соледар Донецької області. Зменшення товщини підпірних стін соляної шахти призвело до втрати їхньої опорної стійкості, що зумовило опускання земної поверхні, руйнування фундаментів і стін житлових й адміністративних будинків на ділянці завдовжки 1,3 км і завширшки 0,5 км. Для ліквідації загрози обвалу відпрацьовані підземні галереї засипано сіллю для укріплення їх підпірних стін. Отже, обвалонебезпечна зона стала унікальним полігоном для вивчення зміни припливних параметрів γ і $\Delta\varphi$ залежно від стану покрівлі шахти. Загалом опрацьовано 256 неперервних щогодинних місячних серій з використанням сучасної методики виключення із вихідних даних їхнього лінійного дрейфу та аномальних метеорологічних збурень на коротких інтервалах спостережень, що дало змогу суттєво підвищити точність визначення припливних параметрів за результатами гармонічного аналізу. Вперше у світовій земноприпливній практиці виявлено нормалізацію нахиломірних параметрів у процесі засипання та після укріплення обвалонебезпечної покрівлі шахти. Якщо до укріплення підпірних стін підземних галерей припливні параметри мали аномальні значення (амплітудний фактор γ на 30 %, а фазовий фактор $\Delta\varphi$ на 10—15 градусів дуги відрізнялись від регіональних аналогів), то в процесі засипання вони наближались до своїх регіональних величин, яких досягли через рік після закінчення процесу засипки. Доведено реальну можливість використання земноприпливного методу для контролю та прогнозу обвалонебезпечного стану та споріднених явищ земної кори.

Ключові слова: обвалонебезпечна зона, нахиломірні спостереження, гармонічний аналіз, земноприпливні параметри, динаміка припливних параметрів.

Вступ. У районах з підвищеною геодинамічною небезпекою для запобігання виникнення можливих соціально-економічних та екологічних катастроф часто використовують нахиломірний метод вивчення деформаційних процесів. Він відзначається високою чутливістю і дозволяє надавати неперервну інформацію про явище, що досліджується у режимі реального часу. Нахиломірні спостереження використо-

вують для знаходження кінематичних параметрів зсувів ґрунту [Stark, Choi, 2008; Garcia, 2010; Mentis, 2015], дослідження вулканічних процесів у сейсмоактивних регіонах [Gambino et al., 2014; Medina et al., 2017; Ricco et al., 2019], моніторингу прогинів земної поверхні в місцях відведення ґрунтових вод, розташування водосховищ, родовищ нафти та газу [Sleeman et al., 2000; Fabian, Kumpel, 2003; Timofeev et al., 2020],

Citation: Kutnyi, A.M., Pavlyk, V.G., Babych, T.M., & Plis, V.P. (2023). Dynamics of tidal parameters depending on the landslide hazard condition of the salt mine roof. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 45(3), 74—87. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i3.282416>.

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

контролю за станом покрівель підземних шахт [Spottiswoode, Milev, 2006], деформацій земної кори під час проходження цунами [Kimura et al., 2013], вивчення карстових процесів [Lesparre et al., 2017] та інших природних і техногенних явищ. Як вихідну інформацію завжди використовують просторово-часові варіації повільних нахилів, які дуже чутливі до локальних змін навколишнього середовища, особливо гідрологічного походження, що значно ускладнює інтерпретацію результатів цих спостережень [Longuevergne et al., 2009; Hermann et al., 2013; Pavlyk et al., 2019].

У деяких випадках для вивчення локальних аномальних геодинамічних процесів, що відбуваються у верхніх шарах земних надр, можна використовувати земноприпливні нахиломірні визначення. Успішним прикладом такого застосування нахиломірних спостережень, які виконувались у Полтавській гравіметричній обсерваторії (1977—1995 рр.), є дослідження динаміки обвалонебезпечної зони, що утворилася в забудованій центральній частині м. Соледар Донецької області над відпрацьованим полем соляної шахти № 1 внаслідок необґрунтованих раціоналізаторських пропозицій із порушенням вимог виробничого процесу. Згідно з проєктом соляний пласт завтовшки 40 м мав розроблятися галереями завширшки 15—20 м та висотою близько 30 м. Товщина міжгалерейних соляних підірних стін мала становити 14—15 м. Фактично вони були зменшені вдвічі і під вагою порід покрівлі шахти вони, втрачаючи опорну здатність, почали вигинатись, а покрівля відповідно опускатись. Поле відпрацьованих галерей розміщене у північно-східному напрямку на глибині 110 м від земної поверхні. Його довжина становила 1,0 км, а ширина — 0,3 км. За даними геометричного нівелювання та виявленими значними порушеннями фундаментів і стін житлових та адміністративних будівель встановлено, що покрівля шахти в обвалонебезпечній зоні має дещо більші розміри (довжина 1,3 км, ширина 0,5 км) і форму опуклого жолоба, де швидкість опускання земної поверхні

в його центральній частині досягала 25 мм за рік [Кутный, 1979] і збільшувалась з часом унаслідок втрати несучої здатності підірних стін соляних галерей шахти. За цих умов під дією земноприпливних сил виникає аномальна деформація її покрівлі, яка суттєво відрізняється від деформації земної поверхні навколишнього непорушеного середовища. Ізодини аномальних деформацій повинні мати форму витягнутих еліпсів з максимальним значенням у центрі зони, а найбільші нахили покрівлі шахти будуть спостерігатись у місцях їхньої максимальної швидкості.

Основна мета наших робіт, що мали як народногосподарське, так і наукове значення — встановити в кількох пунктах неперервний дистанційний контроль за нахилами земної поверхні та отримати інформацію про динаміку припливних параметрів залежно від стану обвалонебезпечної зони.

Для досягнення мети організовано нахиломірні неперервні спостереження вздовж профілю, що перетинає центральну частину зони у найбільш інформативних північно-західному та південно-східному напрямках. Нахиломірні станції № 1 і 2 розташовані на її північно-західному борту, а станції № 3 і 4 — на південно-східному [Кутный, 1979]. Спостереження велись дистанційно і неперервно у геофізичних шурфах завглибшки 6 м двома комплектами фотоелектричних нахиломірів конструкції Островського [Островский, 1961] у взаємно перпендикулярних напрямках північ — південь (NS) і схід — захід (EW). Оперативні дані про повільні нахили земної поверхні у пунктах спостережень регулярно, щодакдно, надсилались в управління виробничого об'єднання «Артемсіль» і слугували підставою для ухвалення рішення щодо ліквідації загрози обвалу покрівлі шахти шляхом засипки сіллю відпрацьованих галерей для зміцнення їх підірних стін.

Для наукових цілей щогодинний матеріал спостережень опрацьовували неперервними місячними серіями земноприпливного гармонічного аналізу за методами

Матвеева та Венедікова [Venedikov, 1960; Матвеев, 1966]. Тоді методика первинної підготовки вихідних даних була не досконалою, оскільки не враховувала їхнього дрейфу на коротких інтервалах спостережень та впливу аномальних метеорологічних збурень. Тому навіть параметри γ та $\Delta\phi$ головних припливних хвиль вдалось виділити зі значними помилками, що дозволило лише якісно оцінити їх зміну в процесі засипки відпрацьованих галерей, яку було розпочато у 1979 р. і закінчено у 1983 р. [Кутный и др., 1988].

Опрацювання та аналіз нахиломірних спостережень. Нахиломірний фактор γ являє собою відношення спостережених амплітуд припливних хвиль до відповідних їм теоретичних, які обчислені для абсолютно твердої поверхні Землі, що не піддається припливним силам Землі. Через числа Лява h і k [Melchior, 1966]

$$\gamma = 1 - k + h,$$

де k — відношення додаткового потенціалу, зумовленого деформацією Землі, до відповідного припливного потенціалу, а h — відношення висоти земного припливу до висоти відповідного океанічного припливу. Для найімовірніших моделей внутрішньої будови Землі деякі автори [Молоденский, 1976; Wahr, 1981; Dehant, 1987; Mathews, 1995] показали, що з точністю не гірше 1 % $k=0,5h$, а тому за умов однорідності та однакових фізичних властивостей земної кори, глобальний чи регіональний фактор $\gamma=1-0,5h$.

Наявність у земній корі геологічних порушень, локальних покладів корисних копалин, різноманітних техногенних чи природних зон, спричиняє зміни її фізичних властивостей, які можуть суттєво відрізнятись від аналогічних у довкіллі. Тому, крім глобальної піддатливості Землі припливним силам, існує й додаткова аномальна деформація її кори, що змінює висоту земного припливу, а отже і число Лява h . Для сферичної, однорідної, ізотропної та ідеально пружної, тобто досить примітивної моделі внутрішньої будови [Melchior, 1966]

$$h = \frac{5}{2} \left(1 - \frac{19\mu}{2g\rho R} \right)^{-1},$$

де μ — модуль жорсткості Ляме, а R , ρ , g — середній радіус, густина та прискорення сили тяжіння Землі відповідно. Для реальної Землі, з урахуванням сейсмічних даних і наявних глобальних земноприливних параметрів, залежність між величинами h , μ і ρ досить складна і ще недостатньо досліджена.

Фактор $\Delta\phi$ — це різниця між одноментними фазами припливних теоретичних хвиль і відповідними їм спостереженими. Для абсолютно твердої поверхні Землі, що не деформується припливними силами, він дорівнює нулю. Глобальне його значення для реальної Землі не перевищує одного градуса дуги. В аномально піддатливих припливним силам зонах він може бути за абсолютною величиною суттєво більшим.

Згідно з робочими гіпотезами [Матвеев, 1970; Кутный, 1974] і теоретичними розрахунками [Молоденский, 1981] аномальні припливні деформації земної кори мають місце поблизу границі зміни її фізичних властивостей. Найбільший вплив на фактор γ відбувається у випадку, коли нахиломірні спостереження виконані у напрямку NS та поблизу границі субширотного простягання [Матвеев, 1970]. Аномальні припливні деформації земної поверхні північніше і південніше цієї границі фактор γ зменшують і збільшують відповідно. В земноприпливній практиці у місцях, де нахиломірні спостереження виконані поблизу геологічних порушень земної кори, виявлено значну і постійну (до 50 %) відмінність фактора γ від його глобального значення [Старков, Старкова, 1970; Баленко и др., 1972].

Згідно з теорією [Молоденский, 1981], аномальні припливні нахили земної кори для напрямку EW у місцях поблизу зміни її фізичних властивостей головним чином впливають на фактор $\Delta\phi$ і лише незначною мірою змінюють фактор γ . У нахиломірній практиці [Кутный та ін., 2015] у більшості пунктів $\Delta\phi$ не перевищує кіль-

кох градусів дуги. Але існують випадки [Евтушенко, 1966], особливо при спостереженнях у шахтах і штольнях, значного відхилення цього фактора від норми. Реальні причини цих відхилень автори не наводять, оскільки зазвичай не володіють достовірними даними про геологічну обстановку та відповідною інформацією про фізичні властивості навколишнього середовища. Максимальні зміни фактора $\Delta\varphi$ для напрямку EW відбуваються поблизу границі порушень фізичних властивостей земної поверхні субмеридіонального напрямку. На сході і на заході цієї границі $\Delta\varphi$ набуває від'ємних і додатних значень, що характеризують відповідно запізнення та випередження фази спостереженої припливної хвилі відносно її теоретичного аналога. Таким чином, обвалонебезпечна зона з аномальною піддатливістю покрівлі припливним силам виявилася в науковому розумінні хорошим полігоном для перевірки гіпотетичних і теоретичних тверджень та дослідження динаміки припливних параметрів залежно від її фізичного стану та розташування на ній пунктів нахиломірних спостережень.

Унікальність нахиломірних спостережень в обвалонебезпечній зоні м. Соледар полягає у тому, що вперше в світовій земноприпливній практиці вони проведені до, під час і після зміцнення покрівлі шахти шляхом засипки галерей відпрацьованого пласта солі. Очевидно, що в цьому процесі змінюватимуться фізичні параметри підпірних міжгалерейних стін покрівлі та всього масиву шахти. Науковий та практичний інтерес за даних умов полягає у виявленні закономірностей зміни факторів γ і $\Delta\varphi$ головних припливних хвиль та ймовірності наближення їх до глобальних чи регіональних значень. На основі отриманих даних можна стверджувати про можливість використання нахиломірного методу не тільки для контролю, а й для прогнозу стану обвалонебезпечних чи споріднених явищ земної кори.

Розроблена та апробована методика виключення з вихідних даних їх лінійного дрейфу та аномальних метеорологічних

збурень на коротких інтервалах спостережень [Кутний та ін., 2013] дає змогу значно підвищити точність визначення припливних параметрів. Враховуючи унікальність спостережень, виконаних у м. Соледар, вирішено повторно опрацювати накопичений матеріал з метою детального дослідження динаміки параметрів припливних хвиль залежно від поступового та неперервного процесу укріплення стін відпрацьованих галерей, а отже, і покрівлі соляної шахти.

Оскільки нахиломірні станції в обвалонебезпечній зоні розташовані практично в її центрі та вздовж профілю у напрямку, перпендикулярному до осьової лінії її простягання, до опрацювання за вищезгаданою методикою залучені результати нахиломірних спостережень усіх чотирьох пунктів для найбільш інформативних напрямків NS та EW.

Для напрямку NS на північно-західному борту обвалонебезпечної зони, де знаходяться нахиломірні станції № 1 і 2, за період з 1977 по 1988 р. сформовано 144 щогодинні безперервних місячні серії нахиломірних спостережень. На південно-східному борту зі спостережень на станціях № 3 і № 4 сформовано 147 аналогічних місячних серій. У напрямку EW за спостереженнями у шурфах № 1 і 2 сформовано 117, а за спостереженнями у шурфах № 3 і 4 — 84 щогодинні місячні серії. Після виключення аномальних метеорологічних збурень і лінійного дрейфу на коротких інтервалах спостережень за допомогою гармонічного аналізу земноприпливних даних визначено параметри шести добових та п'яти півдобових хвиль. Для напрямку NS добові хвилі на широті м. Соледар мають дуже малу амплітуду і практично не виділяються. Що стосується півдобових хвиль, то найбільш інформативними є M_2 , S_2 , N_2 , амплітуди яких становлять від двох до семи мілісекунд дуги. У напрямку EW добові хвилі O_1 і K_1 мають досить значні амплітуди і виділяються гармонічним аналізом з помилками на рівні помилок півдобових хвиль. Для отримання найбільш достовірних параметрів γ і $\Delta\varphi$ по кожній місячній серії для

напрямку NS виконано вагове осереднення за трьома хвилями, а для напрямку EW — за добовими та півдобовними хвилями. За ваги взято величини, які обернено пропорційні квадратам відповідних помилок. Отримані таким чином параметри γ і $\Delta\phi$ з відповідними середньоквадратичними помилками для напрямку NS представлено у

табл. 1, а для напрямку EW — у табл.2. Крім того, наведено інформацію про дату та обсяги засипки відпрацьованих галерей сіллю у відсотках. Оскільки інформацію про засипку відпрацьованих галерей подавали виробничому об'єднанню «Артемсіль» поквартально, виконано також поквартальне осереднення цих даних для дослідження

Таблиця 1. Осереднені поквартально середньовагові параметри головних припливних хвиль N_2 , M_2 , S_2 нахиломірних спостережень в обвалонебезпечній зоні м. Соледар у напрямку NS і дані про засипку відпрацьованих галерей

Рік, квартал	Відсоток засипки	Північно-західний борт (шурфи № 1, № 2)		Південно-східний борт (шурфи № 1, № 2)	
		γ	$\Delta\phi$, град дуги	γ	$\Delta\phi$, град дуги
1977	I	0,0	—	0,939±0,012	-1,2±0,7
	II	0,0	0,502±0,005	0,935±0,014	-0,1±0,8
	III	0,0	0,508±0,006	0,931±0,009	0,2±0,4
	IV	0,0	0,506±0,004	0,920±0,011	-0,3±0,6
1978	I	0,0	0,490±0,007	0,918±0,014	0,6±0,7
	II	0,0	0,507±0,007	0,924±0,012	1,0±0,6
	III	0,0	0,495±0,005	0,893±0,007	-1,2±0,5
	IV	0,0	0,492±0,006	0,877±0,005	-0,7±0,3
1979	I	5,7	0,498±0,004	0,884±0,008	0,1±0,4
	II	10,7	0,505±0,014	0,880±0,005	-0,2±0,3
	III	16,6	0,494±0,004	0,889±0,006	-0,7±0,4
	IV	21,9	0,502±0,005	0,896±0,009	0,7±0,3
1980	I	27,7	0,506±0,006	0,894±0,012	0,4±0,7
	II	34,1	0,500±0,005	0,899±0,009	0,8±0,5
	III	41,5	0,499±0,003	0,894±0,012	-0,6±0,5
	IV	47,9	0,508±0,003	0,896±0,010	-0,5±0,6
1981	I	53,8	0,524±0,006	0,856±0,012	-0,3±0,7
	II	59,2	0,529±0,006	0,822±0,016	-1,5±0,9
	III	64,8	0,524±0,009	0,810±0,058	0,2±0,4
	IV	71,0	0,555±0,005	0,818±0,009	0,1±0,4
1982	I	76,7	0,584±0,006	0,802±0,009	0,8±0,5
	II	83,3	0,581±0,006	0,792±0,006	1,1±0,5
	III	89,4	0,594±0,009	0,778±0,007	1,3±0,5
	IV	96,0	0,625±0,004	0,768±0,008	0,4±0,5
1983	I	96,0	0,649±0,008	0,722±0,002	0,1±0,1
	II	96,0	0,641±0,008	0,717±0,001	0,1±0,1
	III	96,0	0,678±0,020	0,718±0,004	-0,2±0,4
	IV	96,0	0,688±0,011	0,693±0,004	0,1±0,2
1984	I	96,0	0,680±0,008	0,688±0,004	0,5±0,3
	II	96,0	0,693±0,009	0,699±0,004	0,6±0,3
	III	96,0	0,674±0,009	0,712±0,004	0,6±0,3
	IV	96,0	0,678±0,005	0,703±0,010	0,3±0,3
1985	I	96,0	0,668±0,010	0,705±0,008	-0,5±0,7
	II	96,0	0,667±0,006	0,707±0,006	1,2±0,6
	III	96,0	0,668±0,006	0,708±0,006	0,2±0,5
	IV	96,0	0,669±0,005	0,698±0,004	-0,4±0,5
1986	I	96,0	0,670±0,005	0,699±0,004	0,1±0,3
	II	96,0	0,679±0,005	0,690±0,004	0,5±0,3
	III	96,0	0,677±0,004	0,703±0,004	0,2±0,3
	IV	96,0	0,681±0,005	0,700±0,004	1,2±0,3

Рік, квартал	Відсоток засипки	Північно-західний борт (шурфи № 1, № 2)		Південно-східний борт (шурфи № 1, № 2)		
		γ	$\Delta\phi$, град дуги	γ	$\Delta\phi$, град дуги	
1987	I	96,0	0,689±0,005	-0,1±0,3	0,698±0,003	0,0±0,2
	II	96,0	0,678±0,004	0,1±0,3	0,685±0,004	-0,1±0,3
	III	96,0	0,676±0,004	-0,4±0,3	0,691±0,004	0,1±0,3
	IV	96,0	0,684±0,005	0,3±0,4	0,696±0,004	0,1±0,3
1988	I	96,0	0,680±0,006	-0,2±0,5	0,698±0,004	0,2±0,3
	II	96,0	0,680±0,005	0,0±0,4	0,688±0,005	0,4±0,3
	III	96,0	0,677±0,005	-1,2±0,4	0,693±0,005	0,8±0,4
	IV	96,0	0,671±0,004	-1,0±0,3	0,692±0,005	0,2±0,2
Середнє арифметичне до засипки			0,5008±0,0013	-0,63±0,4	0,9044±0,0043	-0,11±0,3
Середнє арифметичне після засипки			0,6773±0,0059	-0,30±0,4	0,6974±0,0048	0,30±0,3
Для регіону України $\gamma=0,6930\pm0,0008$ $\Delta\phi=-0,44\pm0,20$						

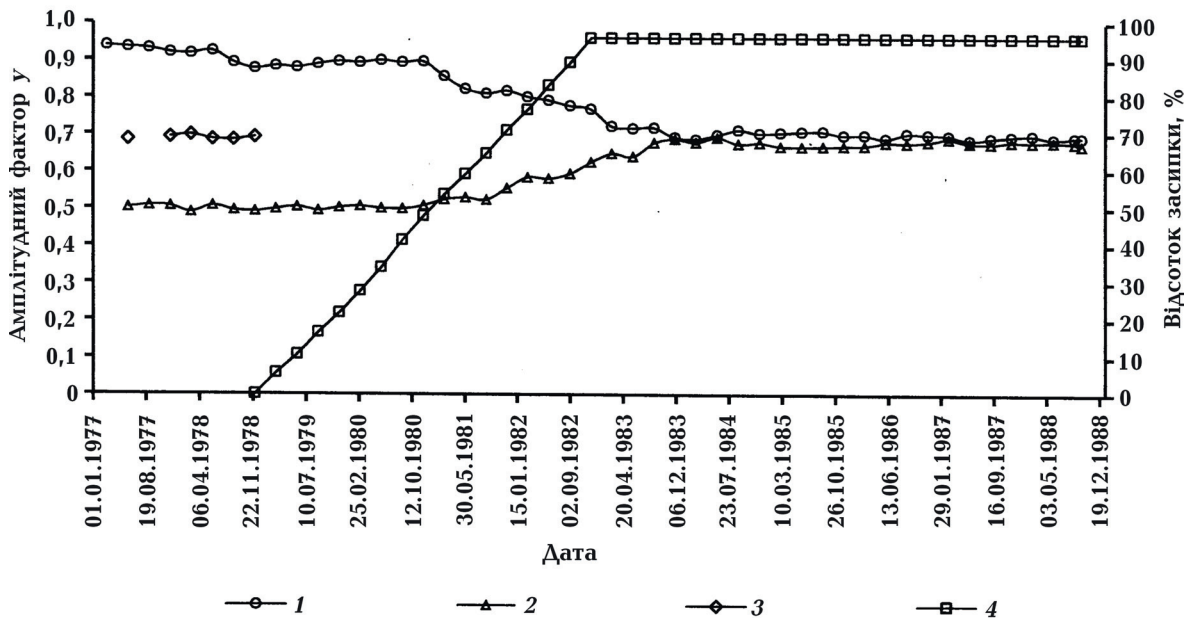


Рис. 1. Середньоквартальні значення амплітудного фактора γ за даними нахиломірних спостережень у напрямку NS на північно-західному і південно-східному бортах покрівлі обвалонебезпечної зони соляної шахти та на глибині залягання пласта солі до, у процесі та після засипки відпрацьованих галерей: 1 — південно-східний борт, 2 — північно-західний борт, 3 — на глибині залягання соляного пласта, 4 — відсоток засипки.

Fig. 1. Quarterly average values of the amplitude factor γ according to the data of tilt observations in the NS direction on the northwestern and southeastern sides of the roof of the landslide hazard zone of the salt mine and at the depth of the salt layer before, during, and after the backfilling of the spent galleries: 1 — northwestern side, 2 — southeastern side, 3 — at the depth of the salt layer, 4 — percentage of backfilling.

динаміки припливних параметрів залежно від обсягу засипки та фізичного стану відпрацьованих галерей.

До кінця 1978 р. паралельно з нахиломірними спостереженнями в обвалонебезпечній зоні велись аналогічні спостереження

в цій шахті на глибині залягання соляного пласта, але в камері, значно віддаленій від галерей цієї зони [Баленко и др., 1979]. Для порівняння з даними, отриманими у шурфах покрівлі шахти, за новою методикою опрацьовано спостереження, проведені в

Таблиця 2. Осереднені поквартально середньовагові параметри головних припливних хвиль N_2 , M_2 , S_2 , O_1 , K_1 нахиломірних спостережень в обвалонебезпечній зоні м. Соледар у напрямку EW і дані про засипку відпрацьованих галерей

Рік, квартал		Відсоток засипки	Північно-західний борт (шурфи № 1, № 2)		Південно-східний борт (шурфи № 3, № 4)	
			γ	$\Delta\phi$, град дуги	γ	$\Delta\phi$, град дуги
1977	I	0,0	—	—	0,703±0,012	-9,7±0,5
	II	0,0	0,693±0,014	14,3±0,8	0,708±0,006	-9,4±0,6
	III	0,0	0,706±0,008	13,7±0,9	0,695±0,008	-9,8±0,6
	IV	0,0	0,688±0,010	14,6±1,0	0,708±0,009	-8,9±0,6
1978	I	0,0	0,689±0,014	13,2±0,5	—	—
	II	0,0	0,690±0,006	14,3±0,7	—	—
	III	0,0	0,706±0,010	15,2±0,5	0,699±0,008	-9,0±0,6
	IV	0,0	0,695±0,009	12,6±0,5	0,702±0,015	-10,2±0,6
1979	I	5,7	0,681±0,010	12,6±0,6	—	—
	II	10,7	0,686±0,020	14,9±0,8	—	—
	III	16,6	0,673±0,012	13,0±0,6	—	—
1980	I	27,7	0,695±0,011	11,3±0,6	—	—
	II	34,1	0,708±0,008	11,8±0,8	—	—
	III	41,5	0,716±0,007	12,20±0,9	0,700±0,014	-8,6±0,8
	IV	47,9	0,700±0,006	9,9±0,6	0,693±0,007	-7,3±0,6
1981	I	53,8	0,712±0,010	9,7±0,6	0,699±0,007	-6,7±0,6
	II	59,2	0,709±0,007	9,2±0,6	0,692±0,010	-5,6±0,6
	III	64,8	0,710±0,005	8,7±0,6	0,702±0,005	-5,2±0,6
	IV	71,0	0,712±0,006	7,8±0,6	0,714±0,006	-5,4±0,7
1982	I	76,7	0,706±0,009	6,8±0,6	0,715±0,006	-5,2±0,5
	II	83,3	0,699±0,005	5,0±0,6	0,715±0,004	-4,2±0,6
	III	89,4	0,703±0,006	3,9±0,7	0,711±0,004	-3,1±0,5
	IV	96,0	0,707±0,007	5,1±0,5	0,710±0,005	-3,8±0,6
1983	I	96,0	0,692±0,006	1,2±0,4	0,706±0,009	-1,6±0,7
	II	96,0	0,710±0,007	0,0±0,7	0,695±0,009	-1,6±0,6
	III	96,0	0,706±0,007	0,3±0,6	0,697±0,010	-0,5±0,7
	IV	96,0	0,715±0,008	-0,2±0,9	0,706±0,009	0,1±0,7
1984	I	96,0	0,730±0,009	-0,4±0,8	0,701±0,004	-0,7±0,6
	II	96,0	0,702±0,005	-0,1±0,7	0,711±0,006	-0,3±0,6
	III	96,0	0,708±0,006	-0,3±0,8	0,716±0,006	-0,5±0,7
	IV	96,0	0,714±0,010	-0,8±0,7	0,722±0,009	0,1±0,6
1985	I	96,0	0,702±0,006	-0,3±0,6	0,706±0,004	-0,2±0,6
	II	96,0	0,692±0,009	-0,5±0,8	0,714±0,006	0,2±0,7
1986	I	96,0	0,694±0,007	-0,9±0,8	0,700±0,006	-0,3±0,9
	II	96,0	0,705±0,006	-0,3±0,6	0,715±0,004	-0,6±0,8
	III	96,0	0,698±0,007	0,7±0,8	—	—
	IV	96,0	0,707±0,005	0,2±0,7	—	—
1987	I	96,0	0,690±0,010	0,1±0,8	—	—
	II	96,0	0,688±0,012	-0,5±0,8	—	—
	III	96,0	0,697±0,013	-0,8±0,8	—	—
Середнє арифметичне до засипки			0,6947±0,004	13,84±0,2	0,7020±0,004	-9,50±0,2
Середнє арифметичне після засипки			0,7030±0,002	-0,29±0,2	0,7111±0,002	-0,24±0,2
Для регіону України $\gamma=0,6930\pm0,0008$ $\Delta\phi=-0,44\pm0,20$						

камері № 4 на постаменті № 5 у напрямку NS за допомогою модернізованих нахиломірів конструкторії Репсольда-Левицького

[Баленко и др., 1974]. Ці спостереження не обтяжені ефектом порожнини [Harrison, 1976; Хасилев, 1978], оскільки постамент

№ 5 розташований у центрі галереї [Баленко и др., 1979]. Із наявного матеріалу сформовано 16 місячних серій неперервних даних, опрацьованих за тією самою методикою, що й серії спостережень в обвалонебезпечній зоні. Отримані та поквартально осереднені за хвилями M_2 , N_2 , S_2 параметри γ і $\Delta\phi$ подано у табл. 3. Вони з точністю не гірше 0,5 % збігаються з аналогічними регіональними параметрами для України [Кутний та ін., 2015], які отримані за даними нахиломірних спостережень на 20 пунктах нахиломірних профілів Київ—Артемівськ [Баленко, Кутний, 1973] і Суми—Херсон [Матвеев и др., 1977] до введення поправок за морські припливи, вплив інерційних сил, еліпсоїдну нормаль і нутацію Землі.

Для кращого візуального сприйняття динаміки найбільш інформативних параметрів γ і $\Delta\phi$, їх поквартальні значення,

отримані у шурфах покрівлі обвалонебезпечної зони і в шахті на глибині залягання соляного пласта, разом з інформацією про засипку відпрацьованих галерей соляної шахти, представлено на рис. 1 і 2.

Висновки. 1. У напрямку NS до засипки відпрацьованих галерей обвалонебезпечної зони амплітудний фактор γ у напрямку NS виявився аномально завищеним на південно-східному і відповідно заниженим на її північно-західному борту порівняно з фактором γ , отриманим у цій шахті на глибині залягання соляного пласта, який з точністю до 0,5 % збігається з аналогічним регіональним значенням для України. Аномальна земноприпливна складова деформації покрівлі соляної шахти в обвалонебезпечній зоні практично однакова і становить майже 30 % від її регіонального значення. Отримані дані переконливо підтверджують теоретичні розрахунки щодо

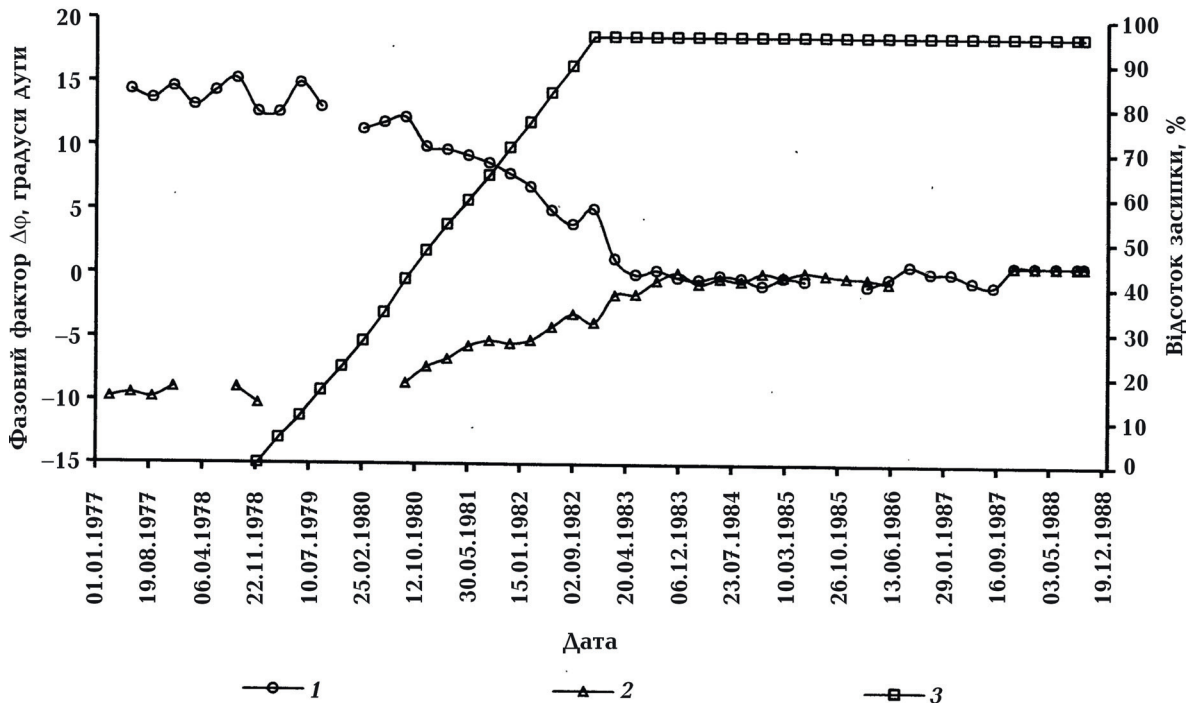


Рис. 2. Середньоквартальні значення фазового фактора $\Delta\phi$ за даними нахиломірних спостережень у напрямку EW на північно-західному та південно-східному бортах покрівлі обвалонебезпечної зони соляної шахти до, у процесі та після засипки відпрацьованих галерей: 1 — південно-східний борт, 2 — північно-західний борт, 3 — відсоток засипки.

Fig. 2. Quarterly average values of the phase factor $\Delta\phi$ according to the data of tilt observations in the EW direction on the northwestern and southeastern sides of the roof of the landslide hazard zone of the salt mine before, during, and after backfilling of the spent galleries: 1 — northwestern side, 2 — southeastern side, 3 — percentage of backfilling.

Таблиця 3. Осереднені поквартально середньовагові параметри γ і $\Delta\phi$ головних припливних хвиль N_2 , M_2 , S_2 нахиломірних спостережень в обвалонебезпечній зоні м. Соледар у напрямку NS на глибині залягання соляного пласта

Рік, квартал		γ	$\Delta\phi$, град дуги
1977	I	—	—
	II	0,687±0,006	0,9±0,8
	III	—	—
	IV	0,692±0,003	0,0±0,5
1978	I	0,700±0,004	0,0±0,5
	II	0,686±0,004	0,1±0,0
	III	0,684±0,003	0,0±0,4
	IV	0,692±0,004	0,4±0,4
Середнє		0,6904±0,0011	0,2±0,1
Для регіону України $\gamma=0,6930\pm0,0008$ $\Delta\phi=-0,44\pm0,20$			

деформації земної кори за умов, коли її локальні фізичні властивості відмінні від аналогічних у довкіллі.

2. У напрямку EW до засипки відпрацьованих галерей шахтного поля обвалонебезпечної зони фазовий фактор $\Delta\phi$, отриманий на північно-західному та південно-східному бортах зони у шурфах № 1 і 2 та № 3 і 4 за абсолютною величиною на 10—15 градусів дуги більший за аналогічний регіональний у цьому напрямку для території України. Значні від'ємні та додатні його значення відповідно на східній та західній частинах досліджуваної території відповідають теоретичним розрахункам і вказують на те, що максимальні деформації покрівлі шахти у меридіональному напрямку відбуваються в центрі обвалонебезпечної зони.

3. Зміни амплітудного фактора γ та фазового зсуву $\Delta\phi$ на обох бортах обвало-

небезпечної зони настають не з початку засипки, а з моменту заповнення галерей приблизно на 40—50 %. Ймовірно, що потрібен певний час, щоб насипна сіль під дією своєї ваги достатньо затверділа і завадила прогинанню підірних стін покрівлі шахти. Надалі до практично повної засипки галерей спостерігається лінійний тренд нормалізації цих факторів, а отже і зменшення локальної аномальної припливної деформації покрівлі соляної шахти, що виявлено вперше у світовій земноприпливній практиці.

4. Лише через рік після припинення засипки галерей і до кінця спостережень амплітудні фактори γ і фазові $\Delta\phi$ на обох бортах покрівлі шахти набули практично стабільних значень і майже зрівнялися за величиною з аналогічними факторами, отриманими поруч, але на глибині залягання соляного пласта цієї шахти і є представницьким як для Бахмутського регіону так і для України в цілому. Це свідчить про цілковиту ліквідацію обвалонебезпечного стану покрівлі шахти.

5. Припливні фазовий фактор $\Delta\phi$ і амплітудний фактор γ , отримані у напрямках NS і EW відповідно на обох бортах обвалонебезпечної зони до, у процесі та після засипки галерей відпрацьованого шахтного поля, виявились, як і передбачено гіпотетичними та теоретичними розрахунками, малочутливими до аномальних деформацій земної кори.

6. Отримані результати динаміки амплітудного фактора γ у напрямку NS і фазового $\Delta\phi$ у напрямку EW до, у процесі та після укріплення підірних стін покрівлі шахи обвалонебезпечної зони переконливо свідчать про реальну можливість використання земноприпливного методу для контролю та прогнозу обвалонебезпечного стану та споріднених явищ земної кори.

Список літератури

Баленко В.Г., Кутный А.М. Некоторые результаты наклономерных наблюдений по профилю Киев—Полтава—Артемовск. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1973. Вып. 5. С. 3—10.

Баленко В.Г., Кутный А.М., Новикова А.Н. Наклономерные наблюдения в г. Карло-Либкнехтовске по программе изучения эффекта полости. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1979. Вып. 11. С. 18—23.

- Баленко В.Г., Кутный А.М., Новикова А.Н., Александров И.М. Наклономерные наблюдения в шахте № 1 рудоуправления «Артемсоль». *Вращение и приливные деформации Земли*. 1972. Вып. 4. С. 20—43.
- Баленко В.Г., Овчинников В.А., Кутный А.М., Голубицкий В.Г. Горизонтальный маятник с цельнеровским подвесом на металлических нитях. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1974. Вып. 6. С. 3—15.
- Евтушенко Е.И. Результаты наклономерных наблюдений в Донбассе за 1960 г. В кн.: *Земные приливы*. Киев: Наук. думка, 1966. С. 23—26.
- Кутный А.М. Влияние меридиональных разломов на приливные наклоны. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1974. Вып. 6. С. 88—92.
- Кутный А.М. Наклономерные наблюдения в обвалоопасной зоне. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1979. Вып. 11. С. 3—8.
- Кутный А.М., Павлик В.Г., Бабич Т.М. Моделирование 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>.
- Кутный А.М., Павлик В.Г., Булацен В.Г., Голубицкий В.Г., Богдан І.Ю., Корба П.С., Бабич Т.М., Плис В.П. Результаты та анализ земноприливних спостережень на території України. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 2. С. 57—73. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i2.2015.111305>.
- Кутный А.М., Токарь В.И., Никитина Т.С. Приливные наклоны в обвалоопасной зоне. В кн.: *Изучение Земли как планеты методами геофизики, геодезии и астрономии*. Киев: Наук. думка, 1988. С. 171—173.
- Матвеев П.С. Гармонический анализ месячной серии наблюдений земных приливов. В кн.: *Земные приливы*. Киев: Наук. думка, 1966. С. 51—59.
- Матвеев П.С. О возможности использования результатов наклономерных наблюдений для исследования особенностей строения земной коры. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1970. Вып. 1. С. 72—86.
- 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. Вып. 9. С. 16—33.
- Молоденский С.М. Влияние локальных неоднородностей коры и верхней мантии на приливные наклоны земной поверхности. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1981. Вып. 13. С. 10—13.
- Молоденский С.М. Изменение чисел Лява при варьировании схемы строения Земли. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1976. № 2. С. 3—14.
- Островский А.Е. Наклономер с фотоэлектрической регистрацией. В кн.: *Изучение земных приливов*. Москва: Изд-во АН СССР, 1961. С. 41—75.
- Старков В.И., Старкова Э.Я. Влияние разлома на величину γ по наблюдениям в Кондаре. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1970. Вып. 1. С. 241—249.
- Хасилев Л.Е. Эффект полости в штольнях некоторых сечений. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1978. Вып. 10. С. 22—30.
- Dehant, V. (1987). Tidal parameters for an inelastic Earth. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 49, 97—116. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(87\)90134-8](https://doi.org/10.1016/0031-9201(87)90134-8).
- Fabian, M. & Kümpel, H.-J. (2003) Poroelasticity: observations of anomalous near surface tilt induced by ground water pumping. *Journal of Hydrology*, 281(3), 187—205. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00234-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00234-8).
- Gambino, S., Falzone, G., Ferro, A., & Laudani, G. (2014). Volcanic processes detected by tiltmeters: A review of experience on Sicilian volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 271 (1), 43—54. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.11.007>.
- García, A., Hördt, A., & Fabian, M. (2010). Landslide monitoring with high resolution tilt measurements at the Dollendorfer Hardt landslide, Germany. *Geomorphology*, 120(1-2), 16—25. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.011>.
- Harrison, J.C. (1976). Cavity and topographic effects in tilt and strain measurement. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth and Planets*,

- 81(2), 319—328. <https://doi.org/10.1029/JB081i002p00319>.
- Hermann, T., Kroner, C., & Jahr, T. (2013). Geoelectrical, strain and tilt investigations of hydrological processes at the broadband geodynamical observatory Moxa, Germany. *Journal of Applied Geophysics*, 98, 90—99. [https://doi:10.1016/j.jappgeo.2013.07.007](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.07.007).
- Kimura, T., Tanaka, S., & Saito, T. (2013). Ground tilt changes in Japan caused by the 2010 Maule, Chile, earthquake tsunami. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(1), 406—415. [https://doi:10.1029/2012JB009657](https://doi.org/10.1029/2012JB009657).
- Lesparre, N., Boudin, F., Champollion, C., Chéry, J., Danquigny, C., Seat, H.C., Cattoen, M., Lizion, F., & Longuevergne, L. (2017). New insights on fractures deformation from tiltmeter data measured inside the Fontaine de Vaucluse karst system. *Geophysical Journal International*, 208(3), 1389—1402. [https://doi:10.1093/gji/ggw446](https://doi.org/10.1093/gji/ggw446).
- Longuevergne, L., Florsch, N., Boudin, F., Oudin, L., & Camerlynck, C. (2009) Tilt and strain deformation induced by hydrologically active natural fractures: application to the tiltmeters installed in Sainte-Croix-aux-Mines observatory (France). *Geophysical Journal International*, 178(2), 667—677. [https://doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04197.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04197.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: Solid Earth*, 100, 9935—9948. <https://doi.org/10.1029/95JB00670>.
- Medina, L.N., Arcosa, D.F. & Battaglia, M. (2017). Twenty years (1990—2010) of geodetic monitoring of Galeras volcano (Colombia) from continuous tilt measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 344, 232—245. [doi:10.1016/j.jvolgeores.2017.03.026](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.03.026).
- Melchior, P. (1966). *The Earth Tides*. Pergamon press.
- Mentes, G. (2015). Investigation of Dynamic and Kinematic Landslide Processes by Borehole Tiltmeters and Extensometers. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 421—427. [https://doi:10.1016/j.proeps.2015.08.025](https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.025).
- Pavlyk, V., Kutnyi, A., & Kalnyk, O. (2019). Features of the influence of seasonal variation of soil moisture on vertical movements of the earth's surface. *Geodynamics*, (2), 16—23. [https://doi:10.23939/jgd2019.02.016](https://doi.org/10.23939/jgd2019.02.016).
- Ricco, C., Petrosino, S., Aquino, I., Gaudio, C., & Falanga, M. (2019). Some Investigations on a Possible Relationship between Ground Deformation and Seismic Activity at Campi Flegrei and Ischia Volcanic Areas (Southern Italy). *Geosciences*, 9(5), 222. [https://doi:10.3390/geosciences9050222](https://doi.org/10.3390/geosciences9050222).
- Sleeman, R., Haak, H.W., Bos, M.S., & Gend, J.A. (2000). Tidal tilt observations in the Netherlands using shallow borehole tiltmeters. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 25(4), 415—420. [https://doi:10.1016/S1464-1895\(00\)00065-X](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(00)00065-X).
- Spottiswoode, S.M., & Milev, A.M. (2006). A study of mine stability using records of ground tilting. *Proc. of the 41st US Symposium on Rock Mechanics, Golden Rocks, Colorado, 17—21 June 2006*. American Rock Mechanics Association. Virginia. ARMA/USRMS 06-1168.
- Stark, T.D., & Choi, H. (2008). Slope inclinometers for landslides. *Landslides*, 5(3), 339—350. [https://doi:10.1007/s10346-008-0126-3](https://doi.org/10.1007/s10346-008-0126-3).
- Timofeev, V.Yu., Timofeev, A.V., Ardyukov, D.G., & Boyko, E.V. (2020). Quartz Tiltmeters and their Use in Geophysical Studies. *Seismic Instruments*, 56, 134—151. [https://doi:10.3103/S0747923920020115](https://doi.org/10.3103/S0747923920020115).
- Venedikov, A.P. (1960). Une methode pour l'analyse des marees terrestres a partir d'enregistrements de longueur arbitraire. *Com. Obs. Roy. Belg. №250 Ser. Geophys.*, 71, 463—485.
- Wahr, J.M. (1981). Body tides on an elliptical, rotating, elastic and ocean less Earth. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 64, 677—703. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1981.tb02690.x>.

Dynamics of tidal parameters depending on the landslide hazard condition of the salt mine roof

A.M. Kutnyi, V.G. Pavlyk, T.M. Babych, V.P. Plis, 2023

Poltava Gravimetric Observatory of the S.I. Subbotin Institute of Geophysics
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Poltava, Ukraine

The dynamics of tidal parameters were studied based on the results of tilt observations in 4 points of the landslide hazard zone, which was formed over the exhausted field of a salt mine in the city of Soledar, Donetsk region. The reduction in the thickness of the supporting walls of the salt mine led to the loss of their supporting stability, which led to the lowering of the ground, the destruction of the foundations and walls of residential and administrative buildings in a plot 1.3 km long and 0.5 km wide. To eliminate the risk of collapse, the used underground galleries were filled with salt in order to strengthen their retaining walls. Thus, the landslide hazard zone has become a unique training ground for studying the change in tidal parameters γ and $\Delta\phi$ depending on the state of the mine roof. In total, 256 continuous hourly monthly series were processed using modern methods of excluding their linear drift and anomalous meteorological disturbances from the initial data at short observation intervals, which made it possible to significantly increase the accuracy of determining tidal parameters based on the results of harmonic analysis. For the first time in the global earth tide practice, the normalization of the tilt parameters during and after strengthening the collapsing roof of the mine was revealed. If before the strengthening of the supporting walls of the underground galleries, the tidal parameters assumed abnormal values (the amplitude factor γ by 30 %, and the phase factor $\Delta\phi$ by 10—15 degrees differed from the regional analogues), then in the process of backfilling they began to approach their regional values, which they reached a year after the backfilling. The real possibility of using the earth tide method for monitoring and forecasting the landslide hazard and related phenomena of the ground has been proven.

Key words: landslide hazard zone, tilt observations, harmonic analysis, tidal parameters, dynamics of tidal parameters.

References

- Balenko, V.G., & Kutnyy, A.M. (1973). Some results of tilt observations along the Kyiv—Poltava—Artemovsk profile. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (5), 3—10 (in Russian).
- Balenko, V.G., Kutnyy, A.M., & Novikova, A.M. (1979). Tilt measurements in the city of Karlo-Liebknichtovsk under the program of studying the effect of the cavity. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (11), 18—23 (in Russian).
- Balenko, V.G., Kutnyy, A.M., Novikova, A.N., & Aleksandrov, I.M. (1972). Tilts observations in mine No. 1 of the «Artemsol» mine management. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (4), 20—43 (in Russian).
- Balenko, V.G., Ovchinnikov, V.A., Kutnyy, A.M., & Golubitskiy, V.G. (1974). Horizontal pendulum with Zellner suspension on metal threads. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (6), 3—15 (in Russian).
- Yevtushenko, E.I. (1966). *Results of tilt observations in Donbass in 1960*. In *The Earth tides* (pp. 51—59). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Kutnyy, A.M. (1974). Influence of meridional faults on tidal tilts. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (6), 88—92 (in Russian).
- Kutnyy, A.M. (1979). Tilt measurements in the landslide zone. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (11), 3—8 (in Russian).
- Kutnyi, A.M., Pavlyk, V.G., & Babich, T.M. (2013).

- Modeling and separate exception of disturbance in terrestrial observations. *Geofizicheskii Zhurnal*, 35(2), 157—162. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i2.2013.111359> (in Ukrainian).
- Kutnyi, A.M., Pavlyk, V.H., Bulatsen, V.H., Golubytskyi, V.H., Bohdan, I.Iu., Korba, P.S., Babych, T.M., & Plys, V.P. (2015). Results and analysis of tidal observations on the territory of Ukraine. *Geofizicheskii Zhurnal*, 37(2), 57—73. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i2.2015.111305> (in Ukrainian).
- Kutnyy, A.M., Tokar, V.I., & Nikitina, T.S. (1988). Tidal tilts in the landslide zone. In *The study of the Earth as a planet by methods of geophysics, geodesy and astronomy* (pp. 171—173). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Matveev, P.S. (1966) Harmonic analysis of a monthly series of observations of earth tides. In *The Earth tides* (pp. 51—59). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Matveev, P.S. (1970). About the possibility of using the observed tilts for the study of the features of the structure of the earth's crust. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (1), 72—86 (in Russian).
- Matveev, P.S., Golubytskyi, V.H., Bohdan, I.Iu., Dubik, B.S., & Slavynskaya, A.O. (1977). Refined values of the earth tide parameters for the points of the tilt profile Sumy-Kherson. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (9), 16—33 (in Russian).
- Molodenskiy, S.M. (1981). Influence of local homogeneities of the crust and upper mantle on tidal tilts of the earth's surface. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (13), 10—13 (in Russian).
- Molodenskiy, S.M. (1976). Changing Love's numbers when varying the scheme of the structure of the Earth. *Byulleten Akademii nauk SSSR. Fizika Zemli*, (2), 3—14 (in Russian).
- Ostrovskiy, A. E. (1961). Tiltmeter with photoelectric registration. In *Study of the Earth's tides* (pp. 41—75). Moscow: Publ. House of the Academy of Sciences of the USSR (in Russian).
- Starkov, V.I., & Starkova, E.Ya. (1970). Influence of the fault on the value of γ according to observations in Kondar. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (1), 241—249 (in Russian).
- Khasilev, L.E. (1978). Cavity effect in galleries of some sections. *Vraschenie i prilivnyie deformatsii Zemli*, (10), 22—80 (in Russian).
- Dehant, V. (1987). Tidal parameters for an inelastic Earth. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 49, 97—116. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(87\)90134-8](https://doi.org/10.1016/0031-9201(87)90134-8).
- Fabian, M. & Kümpel, H.-J. (2003) Poroelasticity: observations of anomalous near surface tilt induced by ground water pumping. *Journal of Hydrology*, 281(3), 187—205. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00234-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00234-8).
- Gambino, S., Falzone, G., Ferro, A., & Laudani, G. (2014). Volcanic processes detected by tiltmeters: A review of experience on Sicilian volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 271 (1), 43—54. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.11.007>.
- García, A., Hördt, A., & Fabian, M. (2010). Landslide monitoring with high resolution tilt measurements at the Dollendorfer Hardt landslide, Germany. *Geomorphology*, 120(1-2), 16—25. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.011>.
- Harrison, J.C. (1976). Cavity and topographic effects in tilt and strain measurement. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth and Planets*, 81(2), 319—328. <https://doi.org/10.1029/JB081i002p00319>.
- Hermann, T., Kroner, C., & Jahr, T. (2013). Geoelectrical, strain and tilt investigations of hydrological processes at the broadband geodynamical observatory Moxa, Germany. *Journal of Applied Geophysics*, 98, 90—99. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.07.007>.
- Kimura, T., Tanaka, S., & Saito, T. (2013). Ground tilt changes in Japan caused by the 2010 Maule, Chile, earthquake tsunami. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(1), 406—415. <https://doi.org/10.1029/2012JB009657>.
- Lesparre, N., Boudin, F., Champollion, C., Chéry, J., Danquigny, C., Seat, H.C., Cattoen, M., Lizion, F., & Longuevergne, L. (2017). New insights on fractures deformation from tiltmeter data measured inside the Fontaine de Vaucluse karst system. *Geophysical Journal International*, 208(3), 1389—1402. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw446>.

- Longuevergne, L., Florsch, N., Boudin, F., Oudin, L., & Camerlynck, C. (2009) Tilt and strain deformation induced by hydrologically active natural fractures: application to the tiltmeters installed in Sainte-Croix-aux-Mines observatory (France). *Geophysical Journal International*, 178(2), 667—677. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04197.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: Solid Earth*, 100, 9935—9948. <https://doi.org/10.1029/95JB00670>.
- Medina, L.N., Arcosa, D.F. & Battaglia, M. (2017). Twenty years (1990—2010) of geodetic monitoring of Galeras volcano (Colombia) from continuous tilt measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 344, 232—245. [doi:10.1016/j.jvolgeores.2017.03.026](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.03.026).
- Melchior, P. (1966). *The Earth Tides*. Pergamon press.
- Mentes, G. (2015). Investigation of Dynamic and Kinematic Landslide Processes by Borehole Tiltmeters and Extensometers. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 421—427. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.025>.
- Pavlyk, V., Kutnyi, A., & Kalnyk, O. (2019). Features of the influence of seasonal variation of soil moisture on vertical movements of the earth's surface. *Geodynamics*, (2), 16—23. <https://doi.org/10.23939/jgd2019.02.016>.
- Ricco, C., Petrosino, S., Aquino, I., Gaudio, C., & Falanga, M. (2019). Some Investigations on a Possible Relationship between Ground Deformation and Seismic Activity at Campi Flegrei and Ischia Volcanic Areas (Southern Italy). *Geosciences*, 9(5), 222. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050222>.
- Sleeman, R., Haak, H.W., Bos, M.S., & Gend, J.A. (2000). Tidal tilt observations in the Netherlands using shallow borehole tiltmeters. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 25(4), 415—420. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(00\)00065-X](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(00)00065-X).
- Spottiswoode, S.M., & Milev, A.M. (2006). A study of mine stability using records of ground tilting. *Proc. of the 41st US Symposium on Rock Mechanics, Golden Rocks, Colorado, 17—21 June 2006*. American Rock Mechanics Association. Virginia. ARMA/USRMS 06-1168.
- Stark, T.D., & Choi, H. (2008). Slope inclinometers for landslides. *Landslides*, 5(3), 339—350. <https://doi.org/10.1007/s10346-008-0126-3>.
- Timofeev, V.Yu., Timofeev, A.V., Ardyukov, D.G., & Boyko, E.V. (2020). Quartz Tiltmeters and their Use in Geophysical Studies. *Seismic Instruments*, 56, 134—151. <https://doi.org/10.3103/S0747923920020115>.
- Venedikov, A.P. (1960). Une methode pour l'analyse des marees terrestres a partir d'enregistrements de longueur arbitraire. *Com. Obs. Roy. Belg. №250 Ser. Geophys.*, 71, 463—485.
- Wahr, J.M. (1981). Body tides on an elliptical, rotating, elastic and ocean less Earth. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 64, 677—703. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1981.tb02690.x>.