

## Використання мікросейсмогенних явищ для розвантаження тектонічних напружень

© П. В. Анахов, 2014

Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна

Надійшла 17 грудня 2013 г.

Представлено членом редколегії Ю. М. Вольфманом

Описаны амплитудная и частотная модуляции стоячих водяных волн (сейш). Показано, что микросейсмические колебания сейшевого происхождения можно использовать для разгрузки тектонического напряжения. Предложены разработки способов их оптимизации.

**Ключевые слова:** возбуждение землетрясений путем наполнения водохранилищ, депрессионная зона водохранилища, микросейсмогенный процесс, модуляция сейш.

**Вступ.** Зменшення небезпеки землетрусу передбачає ініціювання слабкої сейсмічності штучними джерелами з метою зняття надлишкового тектонічного напруження [Страхов, Савин, 2013]. Таке завдання зумовлює два геоінженерні питання: чим керувати, впливаючи на середовище; як це реалізувати на практиці [Шуман, 2013]. Спостережено, що землетруси часто виникають після наповнення водосховищ [Gupta, Rastogi, 1976]. Однією з причин визначено дію мікросейсмогенних процесів — коливання тіла греблі; вібрації від агрегатів електростанцій і потужних насосів; вібрації від падаючої води; варіації рівня води [Капустян, 2002]; утворення на прибережжі та у відкритому морі штормових мікросейсмічних зон [Монахов, 1960]. Таким чином, для розвантаження тектонічного напруження може бути використана дія вібрацій від штучного об'єкта комплексного призначення — водосховища. Прикладами здійснення розвантаження є розробки відповідних способів [Пат., 2013 а—в].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Потрібно визнати, що стихійні лиха у багатьох випадках є невідворотними. Отже, практичним завданням стає оптимізація їх негативних наслідків. Зменшення сейсмічної небезпеки передбачає три взаємозалежні напрями робіт, а саме: сейсмостійке будівництво, короткотерміновий прогноз землетрусів, ініціювання слабкої

сейсмічності штучними джерелами з метою розвантаження тектонічного напруження [Страхов, Савин, 2013]. При цьому зменшення магнітуди землетрусу на 0,3 приводить до зменшення збитків від руйнувань в 1,5 раза у діапазоні магнітуд джерела 0,65—0,75 [Николаев, 2007].

Одна з моделей вогнища для мілкофокусних землетрусів асоціюється з порушенням суцільності середовища і утворенням мікротріщин. Вони зароджуються під впливом наростаючих тектонічних напружень у гірських породах та стрімко переростають у тріщини (розломи) [Страхов, Савин, 2013]. Процес стає лавиноподібним, завершуючись механічним розривом середовища, зумовленим повільним рухом геологічних блоків (плит) з шорсткими краями в різних напрямках [Khachiyap, 2011].

Зміщення крил фрагмента сейсмічно активного тектонічного розлому запропоновано викликати, збуджуючи вибраний фрагмент у такі способи: насичуванням рідиною [Пат., 2000; Пат., 2006 а, б]; ударно-вибуховою або вібраційною дією [Пат., 2006 а]; опромінюванням електромагнітними імпульсами [Пат., 2011].

У ХХ ст. була виявлена можливість виникнення новітньої або підвищення наявної сейсмічної активності внаслідок створення водойм — ефект збудження землетрусів наповненням водосховищ (RTS — від Reservoir Triggered / Induced Seismicity) [Gupta, Rastogi, 1976].

Зазначений ефект став основою "екзотично-го" проекту сейсмозахисту м. Сан-Франциско (США). Місто розташоване між тектонічними порушеннями (розломами) Сан-Андреас на заході та Гайвард — на сході (рис. 1), які є збудниками землетрусів великої сили. Проект полягає в тому, щоб розбити тектонічні розломи на ізольовані ділянки і розвантажувати тектонічне напруження на кожній із них (рис. 2).

Під час наповнення водосховища створюється депресійна зона, межі якої відповідають межах дії геофізичних полів, а тривалість існування — циклам цих полів [Anakhov, 2013]. (Під геофізичними полями, як це запропоновано у статті [Adushkin et al., 2012], розумітимемо фізичні поля Землі й поля, що представлені заданими в просторі значеннями їх геодинамічних параметрів, — поле деформацій, рівень підземних вод, поле мікросейсмічних коливань.)

Характеристику геофізичних полів депресійної зони водосховища, які здатні збуджувати сейсмічно активні тектонічні розломи, наведено в табл. 1.

Насичення порового простору поверхневими водами під час наповнення водосховища приводить до зростання порового тиску від  $\sigma_f^1$  до  $\sigma_f^2$  і відповідного зменшення опору зміщенню від  $\tau_1$  до  $\tau_2$  (рис. 3).

Згідно з теорією міцності Кулона—Мора і принципом К. Терцагі, опір зміщенню крил сейс-

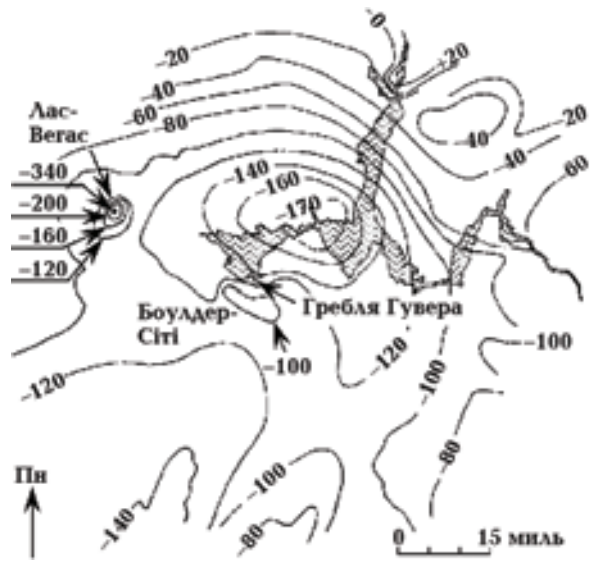


Рис. 2. Карта опускання земної поверхні в зоні розташування водосховища Мід, створеного греблею ім. Гувера на р. Колорадо, США (заштриховано), за період з 1935 (початок наповнення) до 1950 р.; ізолінії опускання — в мм [Rogers, 2000].

моактивного тектонічного розлому, який проходить через депресійну зону, залежить від тиску флюїду [Talwani, 1997; Богомолів, 2012; Киссин, 2013]:

$$\tau = \text{tg } \varphi (\sigma_n - \sigma_f) + c,$$

де  $\text{tg } \varphi$  — показник, що характеризує тертя на площині зміщення;  $\varphi$  — кут внутрішнього тертя;  $\sigma_n$  — нормальне напруження основи;  $\sigma_f$  —



Рис. 1. Розривні тектонічні порушення на узбережжі затоки Сан-Франциско: точками 1—9 показано місця розташування земляних гребель (заввишки до 30 м) і створених ними невеликих водосховищ [Ломтадзе, 1977].

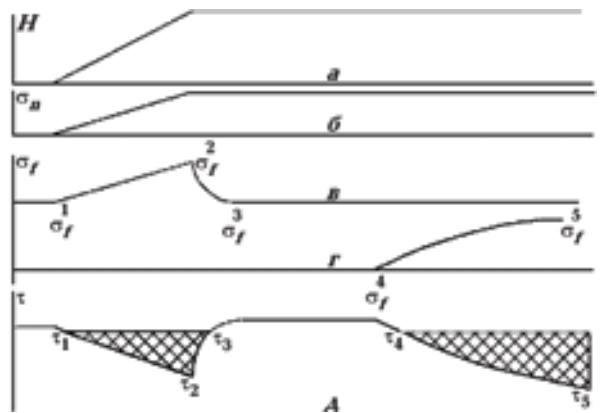


Рис. 3. Схеми наповнення водосховища і відповідні варіації показників збудженої сейсмічності: а — підпірний рівень  $H$ ; б — нормальне напруження основи  $\sigma_n$ ; в, г — поровий тиск флюїду  $\sigma_f$  при наповненні та підвищенні рівня води відповідно; д — опір зміщенню крил розлому  $\tau$  [Talwani, 1997].

**Т а б л и ц я 1.** Характеристика геофізичних полів депресійної зони водосховища, які здатні збуджувати тектонічні розломи [Anakhov, 2013]

Поле / Процес	Межі дії	Цикл
Поле деформацій / Опускання земної поверхні (див. рис. 2)	Об'єм воронки опускання земної поверхні на два порядки перевищує об'єм водосховища [Количко, 1998] за площі воронки району гідровузла, більшої за площу водного дзеркала [Тетельмін, 2009], наявності «критичних» глибин $D = 100$ м [Rothé, 1970] (згідно з публікацією [Николаев, Николаев, 1977], $D = 90$ м; згідно зі статтею [Мирзоев и др., 1986], $D = 100$ м)	Час релаксації, за різними джерелами, може становити, роки: 2,5—6 [Количко, 1998], 3—20 [Варга и др., 1988], до 30 [Тетельмін, 2009]
Рівень підземних вод / Порівний тиск флюїду (див. рис. 3)	У результаті буріння надглибоких свердловин (Кольська — 12 261 м) тріщинуваті проникні зони були виявлені по всій глибині розрізу земної кори [Киссин, 2009]	Дві стадії формування зони підпору ґрунтових вод: інтенсивного підйому, коли формується 70—90 % підпору (тривалість становить найчастіше 5—10 років, на окремих водосховищах — 2—3 роки), та уповільненого підйому до граничного положення (тривалість 15—20 років і більше) [Водохранилища ..., 1986]
Поле мікросейсмічних коливань / Вібрації (див. формулу (1))	Мікросейсми амплітудою $A_{\mu} = 0,02 \div 0,5$ мкм спостерігаються у зоні Нурекської ГЕС (Таджикистан) у періоді скидання води на відстані до 25 км від греблі [Мирзоев, Негматуллаев, 1990]. Дальність дії мікросейсмічних коливань залежить від їх затухання (див. формулу (2))	Визначають мікросейсмогенні процеси: коливання тіла греблі; варіації рівня води; вібрації від падаючої води; вібрації від агрегатів електростанцій і потужних насосів на частоті основного тону $\nu_{\mu} = \nu_N / N_e$ та на кратних частотах $n \cdot \nu_{\mu}$ , де $\nu_N$ — частота струму в електромережі; $N_e$ — кількість пар полюсів машини, $n = 1, 2, \dots, n$ [Капустян, 2002]; штормові мікросейсми [Монахов, 1960]

поровий тиск флюїду;  $c$  — зчеплення (дотичне напруження, прикладене до розлому в напрямку ковзання).

У водонасиченому поровому просторі поровий тиск зменшується від  $\sigma_f^2$  до  $\sigma_f^3$ , опір зміщенню зростає від  $\tau_2$  до  $\tau_3$ . За підвищення рівня води зростає поровий тиск від  $\sigma_f^4$  до  $\sigma_f^5$  і, відповідно, зменшується опір зміщенню від  $\tau_4$  до  $\tau_5$ . Коли опір  $\tau$  зменшується до рівня, нижчого за критичний, крила розлому зміщуються (рис. 3, заштриховано).

Вплив мікросейсмічних коливань малої амплітуди на сейсмічно активний розлом (порушення суцільності) зумовлює накопичення залишкових деформацій одного знака, що спричинює істотне збільшення швидкості деформації і, як наслідок, слабку сейсмічність [Adushkin et al., 2009].

Момент досягнення рівня необхідного зміщення у фрагменті сейсмоактивного тектонічного розлому в процесі втомного впливу, згідно з гіпотезою Пальмгрена—Майнера, відбудеться, коли інтеграл сумарного руйнування досягне одиниці [Островский, 1990]:

$$E = \int_0^N \frac{dN}{N_f (\Delta\varepsilon)_N},$$

де  $N$  — кількість циклів втомного впливу;  $N_f$  — кількість циклів до руйнування;  $\Delta\varepsilon$  — амплітуда деформації.

За досягнення рівня зміщення

$$E_f = \int_0^{N_f} \frac{dN}{N_f (\Delta\varepsilon)_N} = 1. \quad (1)$$

Із співвідношення (1) випливає, що найбільший внесок у процес зміщення відбуватиметься в цикли з максимальними амплітудами. Отже, момент досягнення ним рівня зміщення  $E_f = 1$  буде ймовірнішим у період з найбільшою амплітудою деформації  $\Delta \epsilon$ .

Дальність дії мікросейсмічних коливань залежить від їх затухання, яке визначається, поперше, геометричною розбіжністю та розсіюванням енергії, по-друге, поглинанням сейсмічної енергії в середовищі. Частотно-залежне поглинання  $\alpha$  сейсмічної енергії в середовищі можна оцінити за формулою [Sheriff, Geldart, 1982]

$$\alpha = W_0 \exp(-\beta t) \cos \omega_\mu t, \quad (2)$$

де  $W_0$  — енергія хвилі у джерелі;  $\beta$  — коефіцієнт затухання;  $t$  — час;  $\omega_\mu = 2\pi\nu_\mu$ ,  $\nu_\mu$  — циклічна і лінійна частоти мікросейсміків відповідно.

Виявлено, що найчутливішими до тривалих впливів періодично повторюваних розуцільнень речовини є параметри фільтрації флюїдної фази і напруження розривних порушень у корі, зміни яких спричиняють перебудову мозаїки внутрішніх напружень [Капустян, 2002; Adushkin et al., 2012]. Спільні насичення водою і вібрації сприяють зміні стану розлому: внаслідок цих дій зменшуються тертя на площині зміщення і зчеплення (в результаті виведення шорсткостей із зчеплення), а також збільшується поровий тиск. У результаті стан розлому на його фрагменті може наблизитися до критичного: почне виконуватися умова ковзання Кулона—Мора, навіть якщо рівень первинних напружень був далекий від критичного [Mukhamediev, 2010]. Це враховано у способі розвантаження тектонічного напруження [Пат., 2006 б], який полягає у насичуванні напруженого середовища рідиною в інтервали часу, що відповідають розширенню середовища, зумовленому впливом місячно-сонячних припливів; додатково до, під час і після насичування рідиною проводять вібраційні дії.

Підвищення порового тиску флюїдів (грунтової води) в  $N$ -му циклі навантажень формально визначає функція [Chameau, 1981]

$$(\sigma_f)_N = f \left[ (\Delta \epsilon)_N ; (\sigma_f)_{N-1} \right],$$

де  $\Delta \epsilon$  — амплітуда деформації;  $(\sigma_f)_{N-1}$  — поровий тиск на час завершення  $(N-1)$ -го циклу;  $f$  — знак функції.

**Мета статті.** Згідно із постановкою задачі [Страхов, Савин, 2013], визначено розробку спо-

собів розвантаження тектонічного напруження. Для цього запропоновано використовувати дію поля мікросейсмічних коливань природно-антропогенної системи комплексного призначення "водосховище", що дає змогу знизити матеріальні та фінансові витрати на ініціювання слабкої сейсмічності.

**Виклад основного матеріалу.** Доведено, що високочастотні мікросейсмічні коливання, зумовлені роботою сейсмічних вібраторів, викликають зміщення крил фрагмента сейсмічно активного тектонічного розлому [Пат., 2006 а] (смуга частот стаціонарних вібраторів  $\nu_\mu = 3600 \div 54\,000$  цикл/год [Алексеев и др., 2004]). Спостережено, що мікросейсмічні коливання, зумовлені розгойдуванням висотної 30-метрової споруди із частотою  $\nu_\mu = 900 \div 1200$  цикл/год, привели до зміщення крил фрагмента тектонічного розлому [Пат., 2006 а].

На рис. 4, б показана спектральна густина потужності типових мікросейсмічних шумів, яку окреслюють верхня і нижня межі (NHNМ від New High-Noise Model; NLNM — від New Low-Noise Model) [Peterson, 1993]. Очевидно, що смуга частот мікросейсміків значно ширша за вказану вище.

Природні мікросейсми виникають переважно в результаті передачі в земну кору енергії морських хвиль [Монахов, 1977; McNamara et al., 2011]. Здебільшого штормові мікросейсми (ШМС) є наслідком прибою (від прогресивних хвиль) на берегову лінію [Nanda, 1960; Рыкунов, 1967; Монахов, 1977]. У відкритому морі мікросейсми збурюються зоною стоячих водяних хвиль [Longuet-Higgins, 1950; Табулевич, 1986], частота яких вища за 120 цикл/год і не збігається із частотою власних коливань водного басейну [Лабзовский, 1971].

На рис. 4, в показано узагальнений спектр ШМС, який містить максимуми на частотах 220 ("первинна частота"  $\nu_1$ , що однозначно збігається із частотою морських хвиль) і 540 цикл/год ("подвійна частота"  $\nu_2 = 2\nu_1$ , як результат накладення протилежно спрямованих прогресивних хвиль з утворенням зони стоячих хвиль) [Монахов, 1977].

Система стоячих хвиль  $A$  утворюється внаслідок інтерференції прямої  $A_1(t) = A_1^{\max} \times \sin(kx - \omega t)$  і зустрічної  $A_2(t) = A_2^{\max} \sin(kx + \omega t)$  хвиль [Шулейкин, 1968]:

$$A(t) = A_1(t) + A_2(t) = 2A^{\max} \cos(\omega t) \sin(kx),$$

$$A_1^{\max} = A_2^{\max} = A^{\max}, \quad (3)$$

де  $A(t)$  — миттєва амплітуда рівня в момент ча-

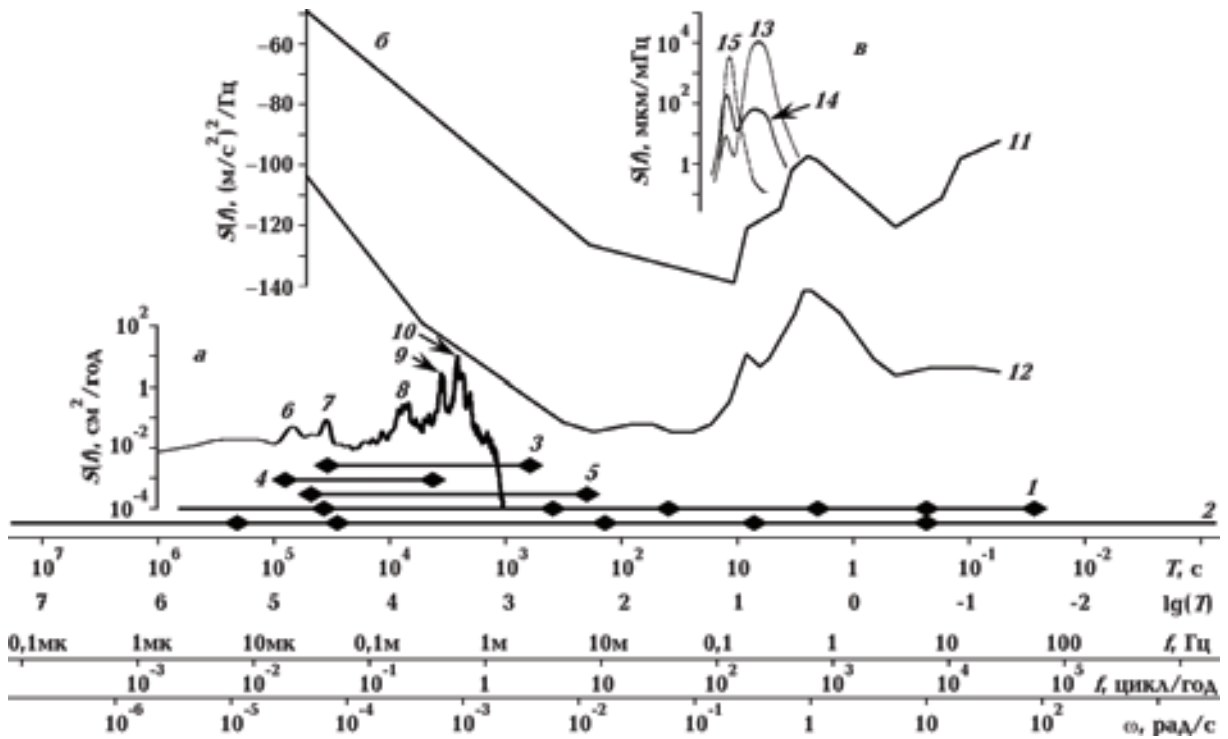


Рис. 4. Смути частот поверхневих водяних хвиль і спектри потужності мікросейсмічних шумів: *a* — смути частот коливань рівня води за різними джерелами (1, 2) і сейш (3–5), див. пояснення в тексті; *спектр коливань рівня води на станції “Севастополь” за період з 02.05. по 30.07.2001 р.:* 6, 7 — припливоутворювальні періоди обертання Сонця і Місяця навколо Землі відповідно; 8–10 — одно-, дво- і тривузлові сейшеві коливання відповідно; *б* — спектр потужності типових мікросейсмів (11 — NНNM, 12 — NLNM); *в* — узагальнені спектри мікросейсмів на суші (13), морських хвиль у прибережній зоні на малій глибині (14), морських хвиль у відкритому океані (15).

су  $t$ ;  $A^{\max}$  — максимальна амплітуда хвилі;  $\omega$  — циклічна частота;  $k = 2\pi / \lambda$  — хвильове число;  $x$  — координата довжини.

Стоячі хвилі зумовлюють коливання всього об'єму водної маси, уподібнюючись поршню, який здійснює зворотно-поступальні рухи (рис. 5). Когерентні (синфазні) коливання, опускаючись, утворюють мікросейсми на дні, піднімаючись, — мікробароми.

Тиск хвилі на дно, який може зумовити виникнення мікросейсмів, розраховують за формулою [Табулевич, 1986]

$$|p| = \rho_w \frac{\omega^2 h^2}{4} \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{1}{\text{sh}^2 kD} \right] \cos 2\omega t, \quad (4)$$

де  $\rho_w$  — густина рідини;  $\omega$ ,  $h$  — циклічна частота і висота хвилі відповідно;  $\text{sh}$  — знак гіперболічного синуса;  $k$  — хвильове число;  $D$  — глибина.

На карті інтенсивності ШМС у діапазоні частот  $= 720\text{—}900$  цикл/год і місцеположення їх

основних джерел для територій країн СНД у “галасливий” сезон (листопад, грудень, січень, лютий) показано взаємне розташування сейсмічних станцій IS31-Актюбінськ, AS057-Борове, Акбулак (Казахстан) та епіцентри спостережених мікросейсмів і мікробаромів частотою  $\nu_\mu = 500$  цикл/год, які були генеровані в Баренцевому морі та на оз. Іссик-Куль (Киргизстан) 21–23 жовтня 2008 р. (рис. 6).

Л. Богомоллов пропонує оцінювати напруження, створені мікросейсмічними коливаннями, за формулою [Богомоллов, 2012]

$$\sigma : \rho_g u_g \omega_\mu A_\mu,$$

де  $\rho_g$  — густина сейсмічних хвиль у ґрунті;  $u_g$  — швидкість поширення пружних хвиль у середовищі за місцем реєстрації мікросейсмів;  $\omega_\mu$ ,  $A_\mu$  — циклічна частота і амплітуда мікросейсмів відповідно.

Для ШМС за значеннями  $\rho_g \sim 2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $V_g \sim 2 \cdot 10^3$  м/с,  $\nu_\mu \sim 360 \div 1080$  цикл/год напруження оцінено:  $\sigma \sim 50 \div 100$  Па. Для випадку вібрацій, порушуваних водоскидом на Нурек-



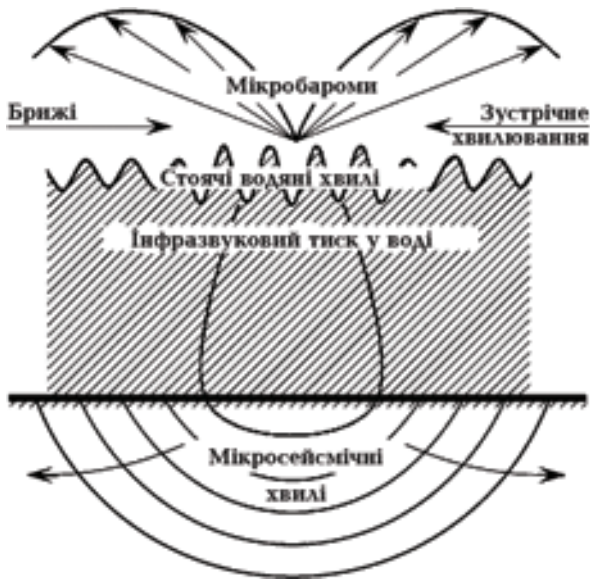


Рис. 5. Комплекс явищ, які виникають за дії стоячих водяних хвиль в атмосфері, гідросфері та земній корі [Табулевич, 1986].

ській греблі,  $A_{\mu} \sim 0,02 \div 0,5$  мкм, характерні частоти мікросейсмів на порядок вищі, ніж частоти штормових мікросейсмів. Отже, і в цьому разі напруження  $\sigma$  оцінено такими самими значеннями.

Проте смуга частот водяних хвиль значно перевищує смугу, яка належить спектру ШМС (див. рис. 4, в). На рис. 4, а показано смуги частот поверхневих водяних хвиль за різними джерелами:

- 1 — за В. Манком (фрагменти спектра зліва направо: хвилі трансприпливні, довгоперіодні, інфрагравітаційні, гравітаційні, ультрагравітаційні, капілярні) [Munk, 1950];
- 2 — за П. Ле Блондом і Л. Майсеком (фрагменти спектра зліва направо: планетарні хвилі (згідно з класифікацією О. Рабіновича, — метеорологічні й сезонні коливання рівня [Рабінович, 1997]); довгоперіодні гравітаційні хвилі; цунамі; брижі; вітрові хвилі; капілярні хвилі) [LeBlond, Mysak, 1978].

Зазначимо, що для всіх водойм характерна дія стоячих водяних хвиль, частота яких збігається із частотою власних коливань водного басейну — сейш [Лабзовский, 1971; Азерникова, 1975; McNamara et al., 2011]. Повідомляється про спостереження сейш на оз. Айсвейхер (Eisweiher, Німеччина), довжина якого становить лише 111 м [Оболенский, 1920].

Смуги частот сейш на рис. 4, а показано за такими джерелами:

- 3 — за Л. Тітовим [Titov, 1971];
  - 4 — за Н. Арсеньевою та ін.: спостережені у 9 великих водоймах країн СНД сейші є коливаннями у діапазоні частот від 0,038 цикл/год у Західному Балхаші (Казахстан) до 1,364 цикл/год в оз. Байкал (Росія) [Арсеньева и др., 1963];
  - 5 — за С. Кодомарою: частоти описаних в наукових роботах сейш, які були спостережені у 50 озерах світу, становлять від 0,070 цикл/год в оз. Ері (Північна Америка) до 25—30 цикл/год в оз. Kuttarako (Японія) [Kodomari, 1982].
- Уяву щодо потужності сейш можна отримати за хвилюваннями, спостереженими у період з 02.05. по 30.07.2001 р. на морській гідрометеорологічній станції "Севастополь" (берег Севастопольської бухти). На рис. 4, а показано спектр коливань рівня води, розрахований за 90-добовою реалізацією у заданий період, де 6, 7 — припливоутворювальні періоди обертання Сонця ( $\nu_T^1 \approx 0,042$  цикл/год) і Місяця навколо Землі ( $\nu_T^2 \approx 0,081$  цикл/год) відповідно; 8—10 — одно-, дво- і тривузлові сейшеві коливання з частотами  $\nu_s^{10} \approx 0,400$ ,  $\nu_s^{20} \approx 0,800$ ,  $\nu_s^{30} \approx 1,111$  цикл/год відповідно [Горячкин и др., 2002].

У статті [Довбнич, 2007] наведено результати оцінки напружень, зумовлених близьки-



Рис. 6. Карта інтенсивності мікросейсмів на територіях країн СНД: 1 — місцезонавання основних джерел ШМС (цифри в кружках: 2 — Тихоокеанський, 3 — Атлантичний, 4 — Чорноморський, 5 — Каспійський, 6 — Середземноморський); амплітуди джерел мікросейсмів, мкм: 2 —  $A_{\mu} < 0,2$ ; 3 —  $A_{\mu} = 0,2 \div 0,4$ ; 4 —  $A_{\mu} = 0,4 \div 0,6$ ; 5 —  $A_{\mu} = 0,6 \div 0,8$ ; 6 —  $A_{\mu} = 0,8 \div 1,0$ ; 7 —  $A_{\mu} = 1,0 \div 1,5$ ; 8 —  $A_{\mu} = 1,5 \div 2,0$  мкм [Рыкунов, 1967]; 9 — епіцентри генерування мікросейсмів і мікробаром 21—23.10.2008 (7 — у Баренцевому морі; 8 — на оз. Иссык-Куль); 10 — розташування сейсмічних станцій (I — IS31-Актюбінськ; II — Акбулак; III — AS057-Борове [Дубровин, Смирнов, 2009].

**Т а б л и ц я 2. Порівняння результатів дії мікросейсмів різного походження [Островский, 1990]**

Походження	Напруження $\sigma$ , Па	Частота $\nu_{\mu}$ , цикл/год	Втомний ефект $\sigma \cdot \nu_{\mu}$ , Па/год
ШМС	120	360	43 200
Місячний приплив	3400	0,081	275
Відношення	0,035	4440	155

ми до сейш за частотою і амплітудою місячно-сонячними припливами, у тектоносфері: для місячних припливів (максимальні розтяжні напруження становлять  $22,4 \cdot 10^3$  Па, стискальні —  $11,2 \cdot 10^3$ , максимальні вертикальні дотичні —  $4,2 \cdot 10^3$  Па); для сонячних припливів (максимальні розтяжні напруження дорівнюють  $10,3 \cdot 10^3$  Па, стискальні —  $5,1 \cdot 10^3$ , максимальні вертикальні дотичні —  $1,9 \cdot 10^3$  Па). Ці значення відповідають значенням, прийнятим у статті [Островский, 1990] для оцінки результатів дії мікросейсмів різного походження (табл. 2).

**Максимізація мікросейсмів за тривалістю.**

Сейші не належать до безперервних процесів. Для прикладу в табл. 3 наведено дані щодо повторюваності сейш у центральній частині Каховського водосховища.

Схильність водойм до збудження сейш демонструється резонансними властивостями водойм [Rabinovich, 2009]. Умовою резонансного збудження водної маси водойми може бути довгоперіодна поверхнева хвиля частотою  $\omega_0$ , що є близькою до частоти  $\omega_s$  сейшевих коливань [Defant, 1961]:

$$A_s = \frac{A_0}{(\omega_s)^2 - (\omega_0)^2}, \quad (5)$$

де  $A_s, A_0$  — амплітуди коливань сейш і збуджуючої хвилі відповідно.

Згідно з принципом комбінаційного резонансу, селективний відгук водної маси водосховища як коливальної системи на вплив із частотою, близькою до частоти її власних коливань, може відбуватися за умови кратного або дробового співвідношення частот сейш  $\nu_s$  (власних коливань басейну) і збуджуючої одиночної хвилі  $\nu_0$  [Анахов, 2013 а]:

$$n\nu_s \approx \nu_0; \quad n = (1, 2, \dots, n) \vee \left( 1, \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{n} \right), \quad (6)$$

де  $n$  — коефіцієнт;  $\vee$  — знак диз'юнкції (логічне "або").

Сейші, раптово виникаючі, схильні до повільного впродовж декількох циклів затухання. Затухання коливань відбувається за законом [Rabinovich, 2009]

$$A_s(t) = A_s^{\max} \exp(-2\delta\omega_s t),$$

де  $A_s(t)$  — миттєва амплітуда сейшів у момент часу  $t$ ;  $A_s^{\max}, \omega_s$  — максимальна амплітуда і циклічна частота сейш відповідно;  $\delta$  — логарифмічний декремент затухання.

**Т а б л и ц я 3. Кількість і загальна тривалість сейш у центральній частині Каховського водосховища в літні місяці 1970—1971 рр. [Судольский, 1991]**

Частота, цикл/год	1970 р.		1971 р.	
	Кількість коливань	Тривалість, год	Кількість коливань	Тривалість, год
0,069—0,111	13	156	12	144
0,118—0,200	37	251	67	456
0,204—0,357	129	504	164	640
0,370—0,500	14	33	11	26
0,526—1,000	21	31	42	63



Рис. 7. Амплітудно-модульовані сейшеві коливання.

Повний цикл генерування сейш — це характерні для резонансу амплітудно-модульовані коливання, що складаються з послідовності етапів — раптового збудження, власне генерування, поступового затухання [Анахов, 2013 а].

На рис. 7 показано амплітудно-модульовані сейшеві коливання (суцільна лінія) на фоні стаціонарних гармонічних коливань (штрихова).

Ідеалізовану обвідну амплітуду сейш (з фіксованими моментами початку/завершення етапів генерування, незмінною максимальною амплітудою і наявністю ділянки без затухання) описують функцією гармонічних коливань

$$A_s(t) = 2A_s^{\max} \cos(n\omega_s t) \sin(kx) \exp(-2\delta\omega_s t) \quad (7)$$

за умов

$$t_0 \leq t \leq t_1 : A_s^{\max} = 0; \quad (8.1)$$

$$t_1 \leq t \leq t_2 : (A_s^{\max} = \text{const}) \neq 0; \delta = 0; \quad (8.2)$$

$$n = (1, 2, \dots, n) \vee (1, 1/2, \dots, 1/n); \quad (8.3)$$

$$t_2 \leq t \leq t_3 : (A_s^{\max} = \text{const}) \neq 0; \delta = 0; n = 1; \quad (8.3)$$

$$t_3 \leq t \leq t_4 : (A_s^{\max} = \text{const}) \neq 0; \delta > 0; n = 1. \quad (8.4)$$

Умова (8.1) описує етап відсутності сейш, (8.2) — етап їх збудження, (8.3) — етап генерування, (8.4) — етап затухання сейш.

Спостережено, що в оз. Севан сейші затухають протягом доби. У багатьох випадках серії коливань (збудження — затухання) слідує одна за одною, так що коливання рівня можуть спостерігатися протягом 4 діб безперервно. Значно рідше серії коливань розділяються декількома днями відсутності сейш [Азерникова, 1975].

На основі аналізу даних і результатів моделювання очікують, що сейші в затоці Монтерей (Тихий океан, США) мають затухати протягом 3—6 циклів. Проте коливання у затоці, на відміну від більшості водних басейнів, є довготривалими. Розглядають шість механізмів "розгойдування" сейш затоки Монтерей: крайові хвилі; зовнішні стосовно затоки анемобаричні хвилі; циркуляції довгоперіодного морського бризу; вторинні (поверхневі) збурення, що виникають за руху стратифікованого потоку внутрішніх сейш; мікротурбулентність; океанічні мікросейсми [Breakey et al., 2010].

Спостережено, що довготривалість сейш в оз. Гатун (Панамський канал) забезпечується дією незалежних джерел — корабельних і вітрових хвиль [McNamara et al., 2011].

Зважаючи на можливість довгодії сейш, пропонуємо їх стимулювання. У випадках відсутності або затухання сейш, визначивши період часу  $T_0 \approx 1/v_0$  скидання або піднімання рівня води під час керування водопропускними гідропорудами, формують хвилю, дотримуючись при цьому умов, по-перше, кратного або дробового співвідношення частот коливань сейшевих і збуджуючої хвиль (6), по-друге, збігу мо-

**Т а б л и ц я 4. Формули розрахунку енергії сейш закритих водойм різних форм, МДж**

Водойм	Формула	Штарнберзьке озеро	
		$W_s$ ( $A = 12,5$ мм)	$W_s$ ( $A = 25$ мм)
Прямокутна, профіль хвилі має вигляд синусоїди	$W_s = \frac{\rho_w g S A^2}{4}$	21,4	85,7
Прямокутна, профіль хвилі має вигляд похилої прямої	$W_s = \frac{\rho_w g S A^2}{6}$	14,3	57,1
Еліптична	$W_s = \frac{\rho_w g S A^2}{16}$	5,4	21,4

Примітки:  $W_s, A$  — енергія і амплітуда коливань сейш відповідно;  $\rho_w \approx 10^3$  кг/м<sup>3</sup> — густина води;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> — прискорення вільного падіння;  $S$  — площа озера.



нотонностей (одночасного зростання або одночасного спадання) сейшевих хвиль з урахуванням інтерференції падаючої і відбитої (3) та збуджуючої хвиль [Пат., 2013 в].

Оцінювання енергії збудження сейш виконав Р. Емден (цит.: за публікацією [Оболенский, 1920]). Ця енергія настільки невелика (табл. 4), що запаси її в природі існують повсюдно: слабкий дощ, незначна зміна тиску, легкі струси землі, напір помірної сили вітру тощо.

Формули, наведені у табл. 4, були застосовані для оцінювання енергії сейш Штарнберзького озера (Баварія) площею 56 км<sup>2</sup>. Вважаючи, що максимальна амплітуда  $A$  дорівнює 25 мм, а середнє її значення — 12,5 мм, Р. Емден отримав чисельні значення для енергії сейш (табл. 4). Для порівняння — під час згоряння 1 кг вугілля виділяється 33,3 МДж механічної енергії. Таким чином, навіть найбільш розвинені сейші Штарнберзького озера мають енергію, що відповідає енергії згоряння 2,5 кг вугілля, а енергія сейш середнього розміру — енергії згоряння 200 г вугілля.

Приміром, на одній частині озера йде легкий дощ, що дає шар опадів 1 мм/год. Якщо швидкість падіння крапель дорівнює 4,5 м/с, то за одну годину дощу озеро отримує енергію 440,3 МДж. Таким чином, слабкий 10-хвилинний дощ доставить енергію (без урахування втрат), достатню для утворення найбільших сейш. Тому в разі несиметричного розподілу дощу над озером можливе збудження сейш.

Припустимо тепер, що над однією частиною озера тиск підвищився на 0,5 мм. Тоді надлишковий тиск тут дорівнюватиме 1863,3 МДж. Якщо внаслідок цього рівень води знизиться на 3 мм, то виникне енергія, достатня для утворення сейш середньої величини.

#### Максимізація мікросейсмів за амплітудою.

Під час аналізу поверхневих сейш у прямокутному басейні постійної глибини, з горизонтальним дном, виявлений ефект їх частотної модуляції функціями морфометричних характеристик, які, у свою чергу, залежать від рівня води [Азерникова, 1975; Анахов, 2012].

Ефект пояснюється узагальненою формулою Меріана [Анахов, 2012]:

$$v_s(t)^{ab} = \frac{\sqrt{g \cdot D(t)}}{2} \sqrt{\left(\frac{a}{L(t)}\right)^2 + \left(\frac{b}{B(t)}\right)^2},$$

$$L(t) = \text{const}, \quad B(t) = \text{const},$$

де  $v_s(t)$  — миттєва частота сейшевих коливань

в момент часу  $t$ ;  $a = 1, 2, \dots, a$ ;  $b = 1, 2, \dots, b$  — кількість вузлів поздовжньої і поперечної сейш (повідомляється про спостереження 16-вузлових сейш [Лабзовский, 1971]);  $D, L, B, D(t), L(t), B(t)$  — глибина, довжина, ширина басейну і закони їх зміни.

Залежність частоти сейш від рівня наповнення котловини (глибини) незмінних форми і розмірів  $v_s(D)$  спостерігалася на оз. Севан (Вірменія) після започаткування в 1933 р. використання його водних запасів у зрошувальних і енергетичних цілях (рис. 8).

Частоти сейш у межах спостережень задовільно апроксимовано лінійною залежністю від рівня води в абсолютних відмітках:  $v_s^{10} = 3600 / (262,711 - 133H_{ASML})$ , цикл/год [Азерникова, 1975].

Помічено, що припливи, якщо їх період збігається із періодом власних коливань басейну, внаслідок резонансу (5) можуть збуджувати сейші [Лабзовский, 1971]. Очевидно, що у разі збігу частоти припливу із частотою власних коливань басейну амплітуда коливань істотно зростатиме [Егоров, 1974]. Тоді спільне використання властивостей залежності частоти сейш від глибини водосховища і резонансу сейш із сумірним за частотою припливом дасть змогу оптимізувати (максимізувати) висоту сейшевої хвилі [Пат., 2013 а]. Рівняння (5) з урахуванням умови кратного або дробового співвідношень частот сейш і припливних коливань (6) запишемо у вигляді

$$A_s = \frac{A_T}{(2\pi v_s)^2 - (2\pi v_T)^2};$$

$$n v_s \approx v_T; \quad n = (1, 2, \dots, n) \vee \left(1, \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{n}\right),$$

де  $A_T, v_T$  — амплітуда і частота припливної хвилі відповідно.

Результатом припливно-сейшевого резонансного збудження є зростання рівня мікросейсмів як функції від висоти сейшевої хвилі, згідно з рівнянням (4).

Довгоперіодні поверхневі хвилі різного походження і штормові мікросейсми впливають на середовище разом. Отже, при інтерпретації необхідний облік їх спільної дії [Сероглазов, 2003].

Одночасна дія мікросейсмичних коливань сейшевого походження і збуджувальних мікросейсмичних коливань, зумовлених постійно діючим полем припливних напружень і деформацій, штормовими мікросейсмами від сусідніх і від-

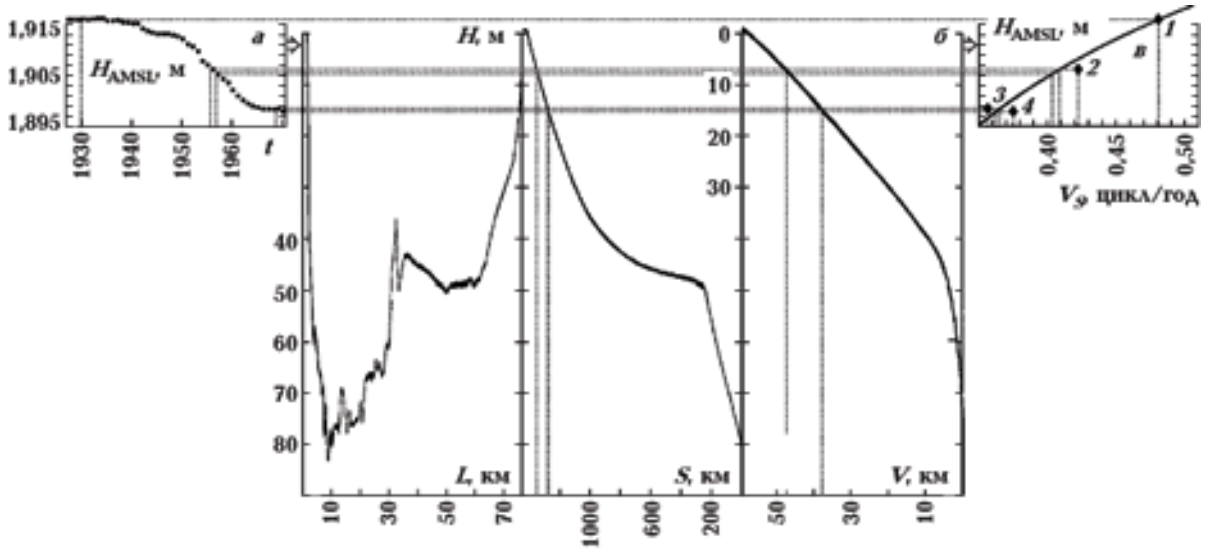


Рис. 8. Зміни рівня  $H$  оз. Севан (а), відповідні зміни морфометричних характеристик (б) і викликані ними зміни частоти сейш (в): а — графік змін рівня озера над рівнем моря  $H_{\text{AMSL}}$  за період  $t$  1926—1971 рр. [Babayán et al., 2005]; б — залежність морфометричних характеристик оз. Севан від рівня води  $H$ , взятого відносно нуля графіка водомірного посту Оленівського водомірного посту, с. Севан, абсолютна відмітка якого становить 1914,43 м: профіль дна за довгою віссю; площа дзеркала  $S$ ; об'єм  $V$  [Давыдов, 1938]; в — частоти спостережених однузлових поздовжніх сейш озера  $v_s^{10}$  (1 — 0,480, 2 — 0,423, 3 — 0,357, 4 — 0,375 цикл/год).

далених водойм тощо, дає змогу оптимізувати (максимізувати) амплітуду мікросейсмів сейшевого походження в точці спільної їх дії [Пат., 2013 б]. Для цього випадку рівняння (5) з урахуванням умови кратного або дробового співвідношення частот мікросейсмів сейшевого походження і збуджуючих коливань (6) запишемо так:

$$A_{\mu(s)} = \frac{A_{\mu_i}}{\left(2\pi v_{\mu(s)}\right)^2 - \left(2\pi v_{\mu_i}\right)^2};$$

$$i = 1; 2; \dots; i; \quad n v_{\mu(s)} \approx v_{\mu_i};$$

$$n = (1; 2; \dots; n) \vee \left(1; \frac{1}{2}; \dots; \frac{1}{n}\right),$$

### Список літератури

Азерникова О.А. Поверхностные и внутренние сейши озера Севан. *Изв. АН Армянской ССР. Науки о Земле.* 1975. № 1. С. 97—101.

Алексеев А.С., Кашун В.Н., Ковалевский В.В., Чичинин И.С., Юшин В.И. Вибрационные источники. В кн.: *Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками.* Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал "Гео" изд-ва СО РАН, 2004. С. 9—18.

де  $A_{\mu(s)}$ ,  $v_{\mu(s)}$  — амплітуда і частота мікросейсмів сейшевого походження відповідно;  $A_{\mu_i}$ ,  $v_{\mu_i}$  — амплітуда і частота збуджуючих мікросейсмів відповідно.

**Висновки.** Описано геофізичні поля депресійної зони водосховища, які здатні збуджувати сейсмічно активні тектонічні розломи. Вібрації від поля мікросейсмічних коливань є дієвими мікросейсмогенними процесами. Досліджено довгоперіодні мікросейсми сейшевого походження, типові для водосховищ. Ефект амплітудної модуляції сейш пропонується використовувати для оптимізації мікросейсмів за тривалістю. Виявлений ефект частотної модуляції сейш можна використати для оптимізації мікросейсмів за амплітудою.

Анахов П.В. Визначення умов збудження сейш; *Матеріали ІХ Міжнародної наук.-практ. конф. "Наукова думка інформаційної епохи"*, Пшемисьль, 07—15 марта 2013 г. Пшемисьль: Nauka i studia, 2013а. С. 45—47.

Анахов П.В. Можливість збудження землетрусу 26 квітня 1986 року в районі Чорнобильської АЕС наповненням охолоджувача; *Матеріали ІХ Міжнародної наук.-практ. конф. "Efektivni"*

- nástroje moderních věd*", Прага, 27 апреля — 05 мая 2013 г. Прага: Publ. House "Education and Science", 2013б, С. 75—81.
- Анахов П. В. Хитанья частоты сейш. *Сборник научных трудов SWorld*. Вып. 2. Т. 3. Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. ЦИТ: 212—605. С. 68—70.
- Арсеньева Н. М., Давыдов Л. К., Дубровина Л. Н., Конкина Н. Г. Сейши на озерах СССР. Ленинград: Изд-во Ленинград. ун-та, 1963. 184 с.
- Богомолов Л. М. Отклики эмиссионных сигналов геосреды на воздействия электромагнитных полей и вибраций: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва: Геофиз. служба РАН, 2012. 36 с.
- Варга А. А., Золотарев Г. С., Парабучев И. А., Романовский Н. Н. Итоги и задачи изучения изменений геологической среды при крупном гидротехническом строительстве. В кн.: *Проблемы рационального использования геологической среды*. Москва: Наука, 1988. С. 139—152.
- Водохранилища и их воздействие на окружающую среду. Отв. ред. Г. В. Воропаев, А. Б. Авакян. Москва: Наука. 1986. 367 с.
- Горячкин Ю. Н., Иванов В. А., Репетин Л. Н., Хмара Т. В. Сейши в Севастопольской бухте. *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2002. Вип. 250. С. 342—353.
- Давыдов В. К. Водный баланс озера Севан. Материалы по исследованию озера Севан и его бассейна. Ч. 6. Ленинград; Москва: Гидрометеоздат, 1938. 82 с.
- Довбнич М. М. Влияние вариаций ротационного режима Земли и лунно-солнечных приливов на напряженное состояние тектоносферы. *Дол. НАН України*. 2007. № 11. С. 105—112.
- Дубровин В. И., Смирнов А. А. Регистрация и параметризация микросейсм и микробаром по данным сети станций НЯЦ РК. *Вестник НЯЦ РК*. 2009. Вып. 2. С. 172—178.
- Егоров Н. И. Физическая океанография. 2-е изд., перераб. доп. Ленинград: Гидрометеоздат, 1974. 455 с.
- Капустян Н. К. Сейсмический мониторинг воздействий техногенных вибраций на земную кору: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва: ИФЗ РАН, 2002. 355 с.
- Киссин И. Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. Москва: Наука, 2009. 328 с.
- Киссин И. Г. Флюиды земной коры и их влияние на сейсмические процессы. В кн.: *Современная тектонофизика. Методы и результаты*. Т. 2. Москва: Ин-т физики Земли РАН, 2013. С. 18—23.
- Количко А. В. Геомеханические аспекты влияния крупных водохранилищ на массивы горных пород. *Гидротехническое строительство*. 1998. № 7. С. 42—48.
- Лабзовский Н. А. Непериодические колебания уровня моря. Ленинград: Гидрометеоздат, 1971. 237 с.
- Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. Ленинград: Недра, 1977. 479 с.
- Мирзоев К. М., Негматуллаев С. Х. Влияние механических вибраций на сейсмичность. *Докл. АН СССР*. 1990. Т. 313. № 1. С. 78—83.
- Мирзоев К. М., Негматуллаев С. Х., Симпсон Д., Соболева О. В. Возбужденная сейсмичность в районе водохранилища Нурекской ГЭС. Душанбе; Москва: Дониш, 1986. 404 с.
- Монахов Ф. И. Микросейсм и их связь с циклонами над морями и океаном. В кн.: *Сейсмические исследования*. Москва: Изд-во АН СССР, 1960. С. 78—104.
- Монахов Ф. И. Низкочастотный сейсмический шум Земли. Москва: Наука, 1977. 96 с.
- Николаев А. В. Исследования наведенной сейсмичности. В кн.: *Национальный отчет Международной ассоциации сейсмологии и физики недр Земли Международного геодезического и геофизического союза 2003—2006*. Москва, 2007. С. 78—85.
- Николаев Н. И., Николаев П. Н. Методические аспекты прогноза возбужденной сейсмичности, связанной с заполнением крупных водохранилищ. В кн.: *Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим*. Москва: Наука, 1977. С. 99—112.
- Оболенский В. Н. Сейши и их теория. *Записки по гидрографии*. 1920. Т. 43. Вып. 2. 64 с.
- Островский А. А. Возможная причина сезонной периодичности некоторых Калифорнийских землетрясений. *Докл. АН СССР*. 1990. Т. 313. № 1. С. 83—86.
- Пат. 2150721 РФ. Способ контроля напряженного состояния сейсмичного района. В. В. Белкин, А. С. Николаев. Оpubл. 10.06.2000, Бюл. № 16.
- Пат. 2273035 РФ. Способ управления режимом смещений во фрагментах сейсмоактивных тектонических разломов. С. Г. Псахье, В. Л. Попов, Е. В. Шилько, С. В. Астафуров, В. В. Ружич, О. П. Смекалин, С. А. Борняков. Оpubл. 27.03.2006а, Бюл. № 9.
- Пат. 2289151 РФ. Способ снятия упругой энергии в напряженных средах для предотвращения землетрясений. К. М. Мирзоев, А. В. Николаев, А. А. Лукк, С. Л. Юнга. Оpubл. 10.12.2006б, Бюл. № 34.
- Пат. 2431158 РФ. Способ снятия упругих напряжений в земной коре для предотвращения

- катастрофических землетрясений. *Н. Т. Тарасов, Н. В. Тарасова*. Оpubл. 10.10.2011, Бюл. № 28.
- Пат.* 83039 Україна. Спосіб управління режимом зміщень у фрагментах сейсмоактивних розривів депресійної зони водосховища. *П. В. Анахов*. Оpubл. 27.08.2013 а, Бюл. № 16.
- Пат.* 84977 Україна. Спосіб управління режимом зміщень у фрагментах сейсмоактивних розломів депресійної зони водосховища. *П. В. Анахов*. Оpubл. 11.11.2013 б, Бюл. № 21.
- Пат.* 84978 Україна. Спосіб стимулювання зміщень у фрагментах сейсмоактивних розломів депресійної зони водосховища. *П. В. Анахов*. Оpubл. 11.11.2013 в, Бюл. № 21.
- Рабинович А. Б.* Длинные волны в океане: захват, резонанс и морские природные катастрофы: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва: Ин-т океанологии, 1997. 27 с.
- Рыкунов Л. Н.* Микросейсмы. Экспериментальные характеристики естественных микровибраций грунта в диапазоне периодов 0,07—8 сек. Москва: Наука, 1967. 86 с.
- Сероглазов Р. Р.* Особенности микросейсмического отклика геофизической среды на динамическое воздействие в условиях платформенных областей: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва: ИФЗ РАН, 2003. 171 с.
- Страхов В. Н., Савин М. Г.* Уменьшение сейсмической опасности: упущенные возможности. *Геофизический журнал*. 2013. Т. 35. № 1. С. 4—11.
- Сугольский А. С.* Динамические явления в водоемах. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. 263 с.
- Табудевич В. Н.* Комплексные исследования микросейсмических колебаний. Новосибирск: Наука, 1986. 151 с.
- Тетельмин В. В.* Воздействие строительства крупных гидроузлов на изостатическое состояние земной коры. *Гидротехническое строительство*. 2009. № 11. С. 46—50.
- Шулейкин В. В.* Физика моря. 4-е изд., перераб. доп. Москва: Наука, 1968. 1083 с.
- Шуман В. Н.* О проблеме фоновой электромагнитно-акустической регуляции сейсмичности: геотехнический аспект. *Геофизический журнал*. 2013. Т. 35. № 1. С. 46—60.
- Adushkin V. V., Kocharyan G. G., Pavlov D. V., Vinogradov E. A., Goncharov A. I., Kulikov V. I., Kulyukin A. A.*, 2009. Influence of seismic vibrations on the development of tectonic deformations. *Doklady Earth Sciences* 426 (1), 588—590. doi: 10.1134/S1028334X09040175.
- Adushkin V. V., Spivak A. A., Kharlamov V. A.*, 2012. Effects of lunar-solar tides in the variations of geophysical fields at the boundary between the Earth's crust and the atmosphere. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 48 (2), 104—116. doi: 10.1134/S1069351312010016.
- Anakhov P. V.*, 2013. Identification of reservoirs in respect of excitation of earthquakes. In: A. G. Shibaev, A. D. Markova (Editors-in-Chief). *Modern scientific research and their practical application*. Odesa: Kupriyenko SV. URL: <http://www.sworld.com.ua/e-journal/j21303.pdf>. CID 213—166.
- Babayan A., Hakobyan S., Jenderedjian K., Muradyan S., Voskanov M.*, 2005. Lake Sevan: Experience and Lessons Learned Brief. In: *Lake Basin Management Initiative*. ILEC foundation. Otsu Shigyo, 347—362.
- Breaker L. C., Tseng Y.-H., Wang X.*, 2010. On the natural oscillations of Monterey Bay: Observations, modeling, and origins. *Progress in Oceanography* 86 (3—4), 380—395.
- Chameau J.-L.*, 1981. Probabilistic and hazard analysis for pore pressure increase in soils due to seismic loading: Dr. filosof. sci. diss. Stanford: Stanford Univ., 232 p.
- Defant A.*, 1961. *Physical oceanography*. Vol. 2. New York: Pergamon Press, 598 p.
- Gupta H. K., Rastogi B. K.*, 1976. Dams and Earthquakes. Amsterdam: Elsevier, 229 p.
- Khachiyani E. E.*, 2011. On a simple method for determining the potential strain energy stored in the earth before a large earthquake. *J. Volcanol. Seismol.* 5(4), 286—297. doi: 10.1134/S0742046311040038.
- Kodomari S.*, 1982. On the Studies of the Periodic Motions in a Lake (2): Effect of the Lake Basin Shape on the Periodic Motion. *J. Faculty Sci., Hokkaido Univ., Ser. 7 (Geophysics)* 7(2), 185—226.
- LeBlond P. H., Mysak L. A.*, 1978. *Waves in the Ocean*. Elsevier Oceanography Series (20), 602 p.
- Longuet-Higgins M. S.*, 1950. A theory of the origin of microseisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Ser. A, Mathematical and Physical Sciences* 243 (857), 1—35.
- McNamara D. E., Ringler A. T., Hutt C. R., Gee L. S.*, 2011. Seismically observed seiche in the Panama Canal. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 116 (B4), 12 p. doi: 10.1029/2010JB007930.
- Mukhamediev Sh. A.*, 2010. Prevention of strong earthquakes: Goal or utopia? *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 46 (11), P. 955—965. doi: 10.1134/S1069351310110054.
- Munk W. H.*, 1950. Origin and generation of waves: *Proceedings 1<sup>st</sup> International Conference on Coastal Engineering*. Long Beach, California: ASCE, 1—4.
- Nanda J. M.*, 1960. The Origin of Microseisms. *J. Geophys. Res.* 65 (6), 1815—1820.
- Peterson J.*, 1993. Observation and modeling of



seismic background noise. Open-File Report 93—322. Albuquerque: U. S. Department of Interior Geological Survey, 42 p.

Rabinovich A.B., 2009. Seiches and Harbor Oscillations. In: *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. Singapore: World Scientific Publ., P. 193—236.

Rogers J.D., 2000. Hoover Dam: Scientific Studies, Name Controversy, Tourist Attraction, and Contributions to Engineering; *Hoover Dam 75<sup>th</sup> Anniversary History Symposium*, 21—22 October, 2010. Las Vegas, 216—248.

Rothé J.P., 1970. Seismes artificiels (Man-made earthquakes). *Tectonophysics* 9 (2-3), 215—238.

Sheriff R.E., Geldart L.P., 1982. *Exploration Seismology*. Vol. 1. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 628 p.

Talwani P., 1997. On the Nature of Reservoir-induced Seismicity. *Pure Appl. Geophys.* 150(3-4), 473—492. doi: 10.1007/s000240050089.

Titov L.F., 1971. *Wind-Driven Waves*. translated from Russian. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations; Springfield, Va., 244 p.

## Releasing of tectonic stresses by using microseismogenic phenomena

© P. V. Anakhov, 2014

Description of amplitude and frequency modulations of standing water waves (seiches) is presented. It is shown that fluctuations of microseisms, origin by seiches, may be used to discharge the tectonic stress. Developed ways to optimize them.

**Key words:** depressing zone of reservoir, mikroseismogenic process, modulation of seiches, reservoir triggered/induced seismicity.

### References

Azernikova O.A., 1975. Surface and internal seiches of Lake Sevan. *Izvestija AN Armjanskoj SSR. Nauki o Zemle* (1), 97—101 (in Russian).

Alekseev A.S., Kashun V.N., Kovalevsky V.V., Chichinin J.S., Yushin V.I., 2004. Vibrating sources of seismic waves. In: *Active seismology with powerful vibration sources*. Novosibirsk: IVMiMG SO RAN, P. 9—18 (in Russian).

Anakhov P.V., 2013a. Determination of conditions of seiches excitation: *Proceeding of the IX International scientific-practical conference "Scientific Mind of the Information Age*, Przemysl, March 07—15, 2013. Przemysl: Nauka i studia, P. 45—47 (in Ukrainian).

Anakhov P.V., 2013b. Possibility of excitation of earthquake on April 26, 1986 near Chernobyl Nuclear Power Plant by reservoir: *Proceeding of the IX International scientific-practical conference "Effective tools of modern science"*, Praha, April 27—May 05, 2013. Praha: Publ. House "Education and Science", P. 75—81 (in Ukrainian).

Anakhov P.V., 2012. Sweep of the frequency of seiches: *Proceeding of scientific papers Sworld*.

Iss. 2, Vol. 3. Odessa: KUPRIENKO, 2012. CIT: 212—605. P. 68—70 (in Ukrainian).

Arsen'eva N.M., Davydov L.K., Dubrovina L.N., Konkina N.G., 1963. Seiches of the Lakes of the USSR. Leningrad: Publ. House of Leningrad State University, 184 p. (in Russian).

Bogomolov L.M., 2012. Responses emission signals geomedium on exposure to electromagnetic fields and vibrations. Abstract of the thesis. Dr phys. and math. sci. diss. Moscow: Geophysical Survey RAS, 36 p. (in Russian).

Varga A.A., Zolotarev G.S., Parabuchev I.A., Romanovsky N.N., 1988. Results and tasks of studying changes in the geological environment with respect to large-scale hydraulic engineering construction. In: *Problems of geological environment rational usage*. Moscow: Nauka, P. 139—152 (in Russian).

*Reservoirs and their influence on the environment*, 1986. Editors-in-Chief G.V. Voropaev, A.B. Avakjan. Moscow: Nauka, 328 p. (in Russian).

Goriachkin Y.N., Ivanov V.A., Repetin L.N., Chma-

- ra T.V., 2002. Seiches in Sevastopol Bay. *Scientific Proceedings of Ukrainian Hydrometeorological Institute* (250), 342—353 (in Russian).
- Davydov L.K., 1938. Water balance of Lake Sevan. Materials of study of Lake Sevan and its basin. Part VI. Leningrad; Moscow: Gidrometeoizdat, 82 p. (in Russian).
- Dovbnich M.M., 2007. The effect of variations of rotational modes of the Earth and lunar-solar tides on the state of stress Tectonosphere. *Dopovidi NAN Ukrainy* (11), 105—112 (in Russian).
- Dubrovin V.I., Smirnov A.A., 2009. Recording and parametrization of microseism and microbaroms using data of NNC RK monitoring network. *National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan Bulletin* (2), 172—178 (in Russian).
- Egorov N.I., 1974. Physical Oceanography. Ed. 2<sup>nd</sup>. Leningrad: Gidrometeoizdat, 455 p. (in Russian).
- Kapustian N.K., 2002. Seismic monitoring of the impacts of man-made vibrations on the earth's crust. Dr phys. and math. sci. diss. Moscow: IPE RAS, 355 p. (in Russian).
- Kissin I.G., 2009. Fluids in the Earth's Crust: Geophysical and Tectonic Aspects. Moscow: Nauka, 328 p. (in Russian).
- Kissin I.G., 2013. Crustal fluids and their influence on seismic processes. In: *Modern tectonophysics. Methods and results*. Vol. 2. Moscow: IPE RAS Publ., P. 18—23 (in Russian).
- Kolychko A.V., 1998. Geomechanic aspects of large-scale reservoirs influence on the bodies of rocks. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo* (7), 42—48 (in Russian).
- Labzovsky N.A., 1971. Noncyclic sea level fluctuations. Leningrad: Gidrometeoizdat, 237 p. (in Russian).
- Lomtadze V.D., 1977. Engineering geology. Engineering geodynamics. Leningrad: Nedra, 479 p. (in Russian).
- Mirzoyev K.M., Negmatullayev C.H., 1990. Influence of mechanical vibrations on seismicity. *Doklady AN SSSR* 313(1), 78—83 (in Russian).
- Mirzoyev K.M., Negmatullaev S.H., Simpson D., Soboleva O.V., 1986. Excited seismicity near reservoir of Nurek HES. Dushanbe; Moscow: Donish, 404 p. (in Russian).
- Monakhov F.I., 1960. Microseisms and their relationship with cyclones over the seas and ocean. In: *Seismic studies*. Moscow: AS USSR Publ., P. 78—104 (in Russian).
- Monakhov F.I., 1977. Low-frequency seismic noise of the Earth. Moscow: Nauka, 96 p. (in Russian).
- Nikolaev A.V., 2007. Studies of induced seismicity. In: *National Report to the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior of the International Union of Geodesy and Geophysics 2003—2006*. Moscow, P. 78—85 (in Russian).
- Nikolaev N.I., Nikolaev P.N., 1977. Methodological aspects of forecast of excited seismicity associated with the filling of large-scale reservoirs. In: *Impact of engineering activity on seismicity*. Moscow: Nauka, P. 99—112 (in Russian).
- Obolensky V.N., 1920. Seiches and their theory. *Zapiski po gidrografii* 43(2), 64 p. (in Russian).
- Ostrovsky A.A., 1990. Possible cause of seasonal periodicity of some California earthquakes. *Doklady AN SSSR* 313(1), 83—86 (in Russian).
- Pat. 2150721 RF. Method for control the stress state in seismic regions. V.V. Belkin, A.S. Nikolaev. Publ. 10.06.2000. (in Russian).
- Pat. 2273035 RF. Method for controlling shifts mode in fragments of seismic-active tectonic fractures. S.G. Psakh'e, V.L. Popov, E.V. Shil'ko, S.V. Astafurov, V.V. Ruzhich, O.P. Smekalin, S.A. Bornjakov. Publ. 27.03.2006a (in Russian).
- Pat. 2289151 RF. Method of take down the elastic energy in stress environments to prevent earthquakes. K.M. Mirzoyev, A.V. Nikolaev, A.A. Lukk, S.L. Junga. Publ. 10.12.2006б (in Russian).
- Pat. 2431158 RF. Method of removing elastic stress in Earth's crust to prevent catastrophic earthquakes. N.T. Tarasov, N.V. Tarasova. Publ. 10.10.2011 (in Russian).
- Pat. 83039 Ukraine. Method for controlling shifts mode in fragments of seismic-active faults of depressing zone of reservoir. P.V. Anakhov. Publ. 27.08.2013a (in Ukrainian).
- Pat. 84977 Ukraine. Method for controlling shifts mode in fragments of seismic-active faults of depressing zone of reservoir. P.V. Anakhov. Publ. 11.11.2013б (in Ukrainian).
- Pat. 84978 Ukraine. Method for stimulation the displacement of fragments of seismically active faults of depressing zone of reservoir. P.V. Anakhov. Publ. 11.11.2013в (in Ukrainian).
- Rabinovich A.B., 1997. Long waves in the ocean: the capture, resonance and marine natural disasters. Abstract of the thesis. Dr phys. and math. sci. diss. Moscow: Institute of Oceanology, 27 p. (in Russian).
- Rykunov L.N., 1967. Microseisms. Experimental characteristics of natural soil microvibrations in range of periods 0,07—8 sec. Moscow: Nauka, 86 p. (in Russian).
- Seroglazov R.R., 2003. Features microseismic response geophysical environment by dynamic impact in terms of the platform regions. Cand. phys. and math. sci. diss. Moscow: IPE RAS, 355 p. (in Russian).

- Strakhov V.N., Savin M.G., 2013. Seismic hazard reduction: lost opportunities. *Geofizicheskij zhurnal* 35(1), 4—11 (in Russian).
- Sudolsky A.S., 1991. Dynamic events in water bodies. Leningrad: Gidrometeoizdat, 263 p. (in Russian).
- Tabulevich V.N., 1986. Complex Study of Microseisms. Novosibirsk: Nauka, 151 p. (in Russian).
- Tetelmin V.V., 2009. Effect of building large-scale hydraulic engineering construction on isostatic state of crustal. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo* (11), 46—50 (in Russian).
- Shuleikin V.V., 1968. Marine Physics. 4<sup>th</sup> ed. Moscow: Nauka, 1083 p. (in Russian).
- Shuman V.N., 2013. On the problem of the background electromagnetic-acoustic regulation of seismic activity: geo-engineering aspect. *Geofizicheskij zurnal* 35(1), 46—60 (in Russian).
- Adushkin V.V., Kocharyan G.G., Pavlov D.V., Vinogradov E.A., Goncharov A.I., Kulikov V.I., Kulyukin A.A., 2009. Influence of seismic vibrations on the development of tectonic deformations. *Doklady Earth Sciences* 426(1), 588—590. doi: 10.1134/S1028334X09040175.
- Adushkin V.V., Spivak A.A., Kharlamov V.A., 2012. Effects of lunar-solar tides in the variations of geophysical fields at the boundary between the Earth's crust and the atmosphere. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 48(2), 104—116. doi: 10.1134/S1069351312010016.
- Anakhov P.V., 2013. Identification of reservoirs in respect of excitation of earthquakes. In: A.G. Shibaev, A.D. Markova (Editors-in-Chief). *Modern scientific research and their practical application*. Odesa: Kupriyenko SV. URL: <http://www.sworld.com.ua/e-journal/j21303.pdf>. CID 213—166.
- Babayan A., Hakobyan S., Jenderedjian K., Muradyan S., Voskanov M., 2005. Lake Sevan: Experience and Lessons Learned Brief. In: *Lake Basin Management Initiative. ILEC foundation*. Otsu Shigyo, 347—362.
- Breaker L.C., Tseng Y.-H., Wang X., 2010. On the natural oscillations of Monterey Bay: Observations, modeling, and origins. *Progress in Oceanography* 86(3—4), 380—395.
- Chameau J.-L., 1981. Probabilistic and hazard analysis for pore pressure increase in soils due to seismic loading: Dr. filosof. sci. diss. Stanford: Stanford Univ., 232 p.
- Defant A., 1961. Physical oceanography. Vol.2. New York: Pergamon Press, 598 p.
- Gupta H.K., Rastogi B.K., 1976. Dams and Earthquakes. Amsterdam: Elsevier, 229 p.
- Khachiyani E.E., 2011. On a simple method for determining the potential strain energy stored in the earth before a large earthquake. *J. Volcanol. Seismol.* 5(4), 286—297. doi: 10.1134/S0742046311040038.
- Kodomari S., 1982. On the Studies of the Periodic Motions in a Lake (2): Effect of the Lake Basin Shape on the Periodic Motion. *J. Faculty Sci., Hokkaido Univ., Ser. 7 (Geophysics)* 7(2), 185—226.
- LeBlond P.H., Mysak L.A., 1978. Waves in the Ocean. *Elsevier Oceanography Series* (20), 602 p.
- Longuet-Higgins M. S., 1950. A theory of the origin of microseisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Ser. A., Mathematical and Physical Sciences* 243(857), 1—35.
- McNamara D.E., Ringler A.T., Hutt C.R., Gee L.S., 2011. Seismically observed seiching in the Panama Canal. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 116 (B4), 12 p. doi: 10.1029/2010JB007930.
- Mukhamediev Sh.A., 2010. Prevention of strong earthquakes: Goal or utopia? *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 46(11), P. 955—965. doi: 10.1134/S1069351310110054.
- Munk W.H., 1950. Origin and generation of waves: *Proceedings 1<sup>st</sup> International Conference on Coastal Engineering*. Long Beach, California: ASCE, 1—4.
- Nanda J.M., 1960. The Origin of Microseisms. *J. Geophys. Res.* 65(6), 1815—1820.
- Peterson J., 1993. Observation and modeling of seismic background noise. Open-File Report 93—322. Albuquerque: U. S. Department of Interior Geological Survey, 42 p.
- Rabinovich A.B., 2009. Seiches and Harbor Oscillations. In: *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. Singapore: World Scientific Publ., P. 193—236.
- Rogers J.D., 2000. Hoover Dam: Scientific Studies, Name Controversy, Tourist Attraction, and Contributions to Engineering: *Hoover Dam 75<sup>th</sup> Anniversary History Symposium*, 21—22 October, 2010. Las Vegas, 216—248.
- Rothé J.P., 1970. Seismes artificiels (Man-made earthquakes). *Tectonophysics* 9 (2-3), 215—238.
- Sheriff R.E., Geldart L.P., 1982. Exploration Seismology. Vol. 1. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 628 p.
- Talwani P., 1997. On the Nature of Reservoir-induced Seismicity. *Pure Appl. Geophys.* 150(3-4), 473—492. doi: 10.1007/s000240050089.
- Titov L.F., 1971. Wind-Driven Waves. translated from Russian. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations; Springfield, Va., 244 p.