

## СЕЙСМІЧНА РОЗВІДКА МЕТОДОМ ХИТНОЇ ЧАСТОТИ

П.В. Анахов

Державний університет телекомунікацій, вул. Солом'янська, 7, Київ 03110, Україна,  
e-mail: anakhov@rambler.ru

Розглянуто нестійкість частот стоячих хвиль водойми (сейш) у різних масштабах часу – від короткочасного, порівнянного із періодом сейш, до тривалого, що цей період значно перевищує. Визначено, що частоту стоячих хвиль водного басейну у першому випадку задає фаза збуджувального коливання, у другому – глибина водойми. Запропоновано методи сейсмічної розвідки, в яких використовують хитання частот сейш – короткочасне фазомодульоване, тривале частотно-модульоване.

**Ключові слова:** мікросейсмогенне явище, фазова модуляція сейш, хитання частоти, частотна модуляція сейш.

**Вступ.** Використання мікросейсмогенних явищ у сейсмічній розвідці дає змогу відмовитись від збудження пружних хвиль за допомогою дорогих ударно-вибухових і вібраційних технологій, які, до того ж, завдають шкоди довкіллю і становлять небезпеку нещасного випадку.

Для сейсмічного просвічування земної кори слугують мікросейсмічні коливання, збуджувані дією вітру на високі споруди [9, 11]. Розрахункове значення частоти основного тону власних коливань для будівель простої форми добре задовольняє емпіричній оцінці  $f_b = 50 k/h$ , де  $h$  – висота будівлі, коефіцієнт  $k \cong 1$  м/с за визначення висоти в метрах. Таким чином, споруди заввишки понад 10 м випромінюватимуть у середовище сейсмічний сигнал частотою 5 Гц і нижче [11].

Для сейсмічної розвідки використовують мікросейсми від хвиль водойм:

- збуджувані дією прибою, частота 0,2–0,3 Гц [9];
- збуджувані стоячими хвилями (сейшами), частота яких збігається із частотою власних коливань водного басейну [6, 7].

Розрахункове значення частоти добре задовольняє оцінці за формулою Меріана для прямокутного басейну з горизонтальним дном [7]:

$$f_s^{ab} = \frac{\sqrt{g \times D}}{2} \sqrt{\left(\frac{a}{L}\right)^2 + \left(\frac{b}{W}\right)^2}$$

де  $f_s$  – характерна частота;  $a = 1; 2; \dots$ ;  $b = 1; 2; \dots$ ;  $a, b$  – кількість вузлів поздовжньої і поперечної сейш, відповідно;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – прискорення вільного падіння;  $D, L, W$  – характерні глибина, довжина і ширина басейну відповідно.

Спостережені в 50 озерах світу і описані в наукових роботах частоти сейш змінюються від 19,3 мкГц (період  $T = 863$  хв) в оз. Ері (Півн. Америка,  $D = 18,2$  м,  $L = 376$  км) до 8,3 мГц ( $T = 2$  хв) в оз. Куттара-ко (Kuttara-ko, Японія,  $D = 105$  м,  $L = 2,45$  км) [12].

Використання для сейсмічної розвідки сейшових коливань водної маси проти коливань споруд і прибою має такі переваги.

1. Сейшові хвилі допускають штучне розгойдування. Збуджувальна хвиля формується за рахунок встановлення визначеного інтервалу часу скидання або підйому води за керування водопропускними гідроспорудами. Під час розгойдування дотримуються умови кратного або дробового співвідношення частот коливань затухаючої  $f_s$  і збуджувальної  $f_o$  хвиль [6]:

$$A_s = \frac{A_o}{\left| (2\pi f_s)^2 - (2\pi f_o)^2 \right|}, \quad n f_s \approx f_o,$$

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

де  $A_s, A_o$  – амплітуда коливань сейшової і збуджувальної хвиль;  $n$  – коефіцієнт;  $\vee$  – знак диз'юнкції.

2. Сейсмічний сигнал сейшового походження характеризується більшою дальністю дії [7]. Дальність дії методу залежить від затухання мікросейсмів, яке визначається, по-перше, геометричною розбіжністю та розсіюванням енергії, по-друге, поглинанням сейсмічної енергії в середовищі. Поглинання сейсмічної енергії можна оцінити за формулою [10]

$$\alpha = E_o \exp(-\beta t) \cos \omega_\mu t,$$

де  $E_o$  – енергія хвилі в джерелі;  $\beta$  – коефіцієнт затухання;  $t$  – час;  $\omega_\mu = 2\pi f_\mu$ ,  $f_\mu = f_s$  – циклічна і лінійна частоти мікросейсмів відповідно.

3. Довгоперіодні сейшові коливання модулюють високочастотні мікросейсми, зумовлені розтріскуванням під вагою води (так само, як викликані вітром низькочастотні власні коливання висотних об'єктів модулюють спричинені розтріскуванням високочастотні мікросейсми [5]). Наведене явище модуляції

високочастотних сейсмічних шумів Землі, яке пов'язане з довгоперіодними деформувальними процесами, експериментально довели Л. Рикунів, О. Хаврошкін і В. Циплаков (відкриття № 282, заявка № ОТ-9032 від 03.07.1975 р.). Згідно з цією теорією, довгоперіодні коливання корелюють із високочастотними, завдяки чому можлива їх спільна інтерпретація. У такому випадку підвищується результуюча ймовірність достовірності прийнятого сейсмічного сигналу  $P_{res}$ , яку розраховують за формулою [4]

$$P_{res} = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - P_i)$$

де  $P_i$  – імовірність достовірності прийнятого низькочастотного або високочастотного сигналу.

**Не розв'язана раніше проблема.** Спостереження хвилювання оз. Севан (Вірменія) і Аральського моря (Казахстан, Узбекистан) виявили нестабільність частот опорного сигналу – сейш [1, 3]. Це негативно впливає на проведення вимірювань.

Водночас у сейсмічній розвідці запропоновано збудження мікросейсмів нестабільної, але керованої частоти методом хитання – гойданням стовпа флюїду у свердловині із частотою його хитних власних коливань [14]. Перевагою такого методу перед методом фіксованої частоти є можливість спостерігати резонансні частоти коливань об'єкта.

В оз. Севан виявлена залежність частоти сейш від глибини води  $f_s(D)$  [2]. Отже, використання мікросейсмів сейшового походження, генерованих водою в циклах хитання рівня (поповнення/спрацювання), під час сейсмічної розвідки об'єкта середовища дасть змогу зняти його амплітудно-частотну характеристику – залежність  $A(f_s)$ , у смузі хитання частот  $f_s^{\min} \leq f_s \leq f_s^{\max}$ .

**Мета статті** – розробка методів сейсмічної розвідки, які використовують властивість хитання частоти сейш.

**Тривале частотно-модульоване хитання.** Водоймам властиві довгоперіодні варіації рівня в циклах поповнення/спрацювання (регулювання) – багаторічного, сезонного, місячного, тижневого, добового. На рис. 1 представлено приклад чітко вираженого сезонного (річного) циклу поповнення/спрацювання корисного об'єму водосховища.

Ефект залежності частоти сейш від рівня води пояснюється узагальненою формулою Меріана [2]:

$$f(t)_s^{ab} = \frac{\sqrt{g \times D(t)}}{2} \sqrt{\left(\frac{a}{L(t)}\right)^2 + \left(\frac{b}{W(t)}\right)^2}$$

де  $f_s(t)$  – миттєва частота сейшових коливань у момент часу  $t$ ;  $D(t)$ ,  $L(t)$ ,  $W(t)$  – закони зміни глибини, довжини і ширини басейну.

Хитання частоти власних коливань стовпа флюїду у свердловині досягають, змінюючи висоту стовпа ( $f_s(D)$  при  $L(t) = \text{const}$ ,  $W(t) = \text{const}$ ) або його об'єм за “стискання” свердловини наддувним рукавом ( $f_s(D, L, W)$  при  $L(t) \neq \text{const}$ ,  $W(t) \neq \text{const}$ ) [14].

Варіювання глибини водойми, яке полягає у зміні рівня від мінімального до максимального і назад, згідно з визначеною залежністю  $f_s(D)$ , викликає відповідне хитання частоти сейш ( $f_s(D)$  при  $L(t) = \text{const}$ ,  $W(t) = \text{const}$ ). Використання мікросейсмів хитної частоти під час сейсмічної розвідки об'єкта середовища дає змогу зняти його амплітудно-частотну характеристику – залежність  $A(f_s)$ , де  $f_s^{\min} \leq f_s \leq f_s^{\max}$  [6, 7].

**Короткочасне фазомодульоване хитання.** Спостереження хвилювання Аральського моря виявили нестабільність частоти сейш за незмінного рівня води. Дані щодо спостережених сейш наведено у табл. 1.

Можливою причиною нестійкості частот Л. Берг вважає інтерференцію затухаючих сейш і збуджувальних хвиль тієї самої або близької частоти [3].

Повний цикл генерування сейш – це характерні для резонансних амплітудно-модульовані

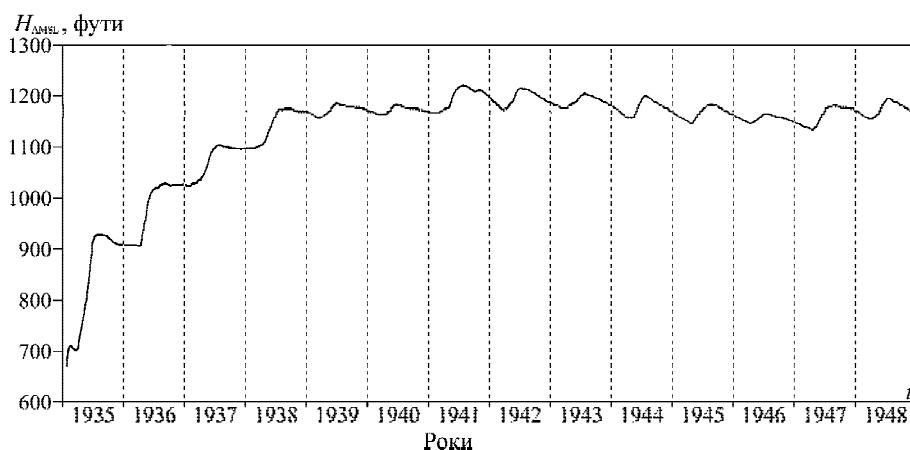


Рис. 1. Зміни рівня поверхні води водосховища Мід (США) над рівнем моря  $H_{AMSL}$  [13]

Таблиця 1. Сейші Аральського моря, спостережені у 1904–1905 рр. [3]

Хвиля	Частота, мкГц	
	спостережена	розрахована*
Поздовжня одновузлова (унінодальна) $f_{10}$	11,8–12,6 ( $T = 22 \div 23,5$ год)	14,6
Поздовжня двовузлова (бінодальна) $f_{20}$	27,8–34,7 ( $T = 8 \div 10$ год)	29,3

\*  $\bar{D} = 16$  м;  $L = 428$  км.

коливання, що складаються з послідовності етапів – відсутності коливань, раптового збудження, поступового затухання [2].

Сейшові коливань затухають за експоненціальним законом [15]

$$A(t)_s = A_s \exp(-2\delta\omega_s t),$$

де  $A(t)_s$  – миттєва амплітуда сейш в момент часу  $t$ ;  $A_s = A_s^{\max} \sin(2\pi f_s t + \varphi_s)$  – амплітуда сейш;  $\varphi_s$  – фаза сейш;  $\omega_s = 2\pi f_s$  – циклічна частота сейш;  $\delta$  – логарифмічний декремент затухання.

У разі збудження затухаючих сейш хвилею близької частоти отримуємо сумарний сигнал виду

$$A(t)_{res} = A(t)_s + A(t)_o; (f_s \neq f_o) \wedge (f_s \approx f_o),$$

де

$$A(t)_o = A_o \exp(-2\delta\omega_o t); A_o = A_o^{\max} \sin(2\pi f_o t + \varphi_o);$$

$\varphi_o, \omega_o = 2\pi f_o$  – фаза і циклічна частота збуджувальної хвилі відповідно;  $\wedge$  – знак кон'юнкції.

У разі збудження затухаючих сейш несинфазною хвилею такої самої частоти отримуємо сумарний сигнал виду

$$A(t)_{res} = A(t)_s + A(t)_o; f_s = f_o; \varphi_s \neq \varphi_o.$$

Неузгодженість затухаючої і збуджувальної хвиль за частотою або фазою зумовлює фазову модуляцію затухаючої сейшової хвилі. На рис. 2 показано збудження затухаючих сейш несинфазною хвилею тієї самої частоти на фоні стаціонарних гармонічних коливань.

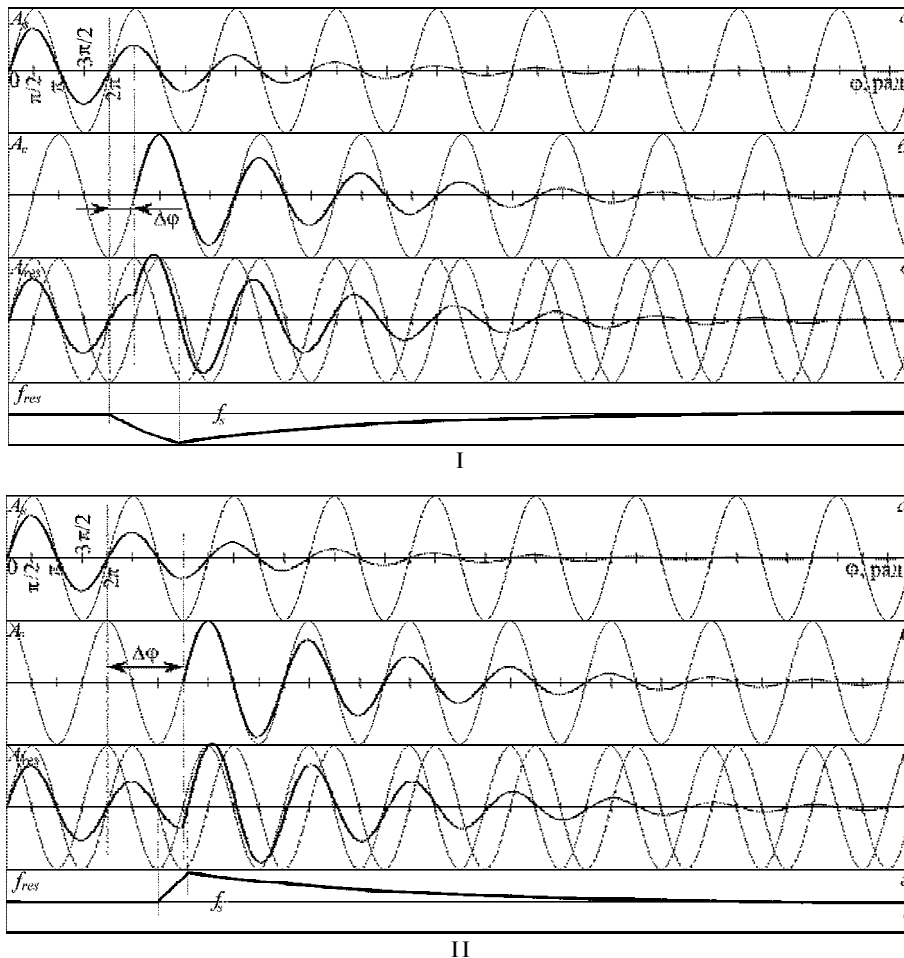


Рис. 2. Збудження затухаючих сейш несинфазною хвилею із зсувом фази  $\Delta\varphi = \varphi_o - \varphi_s = \pi/2$  (I),  $\Delta\varphi = \varphi_o - \varphi_s = 3\pi/2$  (II). Амплітуди: а – затухаючої сейшової хвилі, б – збуджувальної хвилі, в – результуючої сейшової хвилі; г – коливання частоти результуючої хвилі [8]

За зсуву збуджувальної хвилі на кут, менший за півперіод ( $0 < (\Delta\varphi = \varphi_o - \varphi_s) < \pi$ , де  $\varphi_s$  – фаза сейшової хвилі;  $\varphi_o$  – фаза збуджувальної хвилі;  $0^\circ \leq \Delta\varphi \leq 360^\circ$  – зсув фаз), частота результуючої хвилі  $f_{res}$  спадає, а потім поступово відновлюється (рис. 2, I).

За зсуву збуджувальної хвилі на кут, більший за півперіод ( $\pi < (\Delta\varphi = \varphi_o - \varphi_s) < 2\pi$ ), частота результуючої хвилі  $f_{res}$  спочатку зростає (рис. 2, II).

**Висновки.** Обґрунтовано сильний бік сейсмічної розвідки з використанням сейш:

- 1) сейшові хвилі допускають штучне розгойдування;
- 2) мікросейсми сейшового походження характеризуються великою дальністю дії;
- 3) сейшові хвилі модулюють височастотні мікросейсми, що дає змогу здійснювати їх спільну інтерпретацію і визначати підвищення ймовірної достовірності прийнятого сейсмічного сигналу;
- 4) сейшові хвилі допускають контрольоване хитання частоти, використання якого дає змогу знімати амплітудно-частотну характеристику об'єкта середовища.

Гідрологічні спостереження оз. Севан виявили нестійкість частот сейш за зміни рівня води. Ефект пояснюється частотною модуляцією стоячих хвиль функцією глибини водойми за умови  $f_s \gg f_D$ , де  $f_s$  – частота модульованих сейшових коливань;  $f_D$  – частота модулюючих коливань глибини.

Гідрологічні спостереження Аральського моря виявили нестійкість частот сейш за незмінного рівня води. Цей ефект пояснюється фазовою модуляцією стоячих хвиль під час розгойдування за умов  $[(f_s \neq f_D) \wedge (f_s \approx f_D)] \vee (f_s = f_D, \varphi_s \neq \varphi_D)$ , де  $f_s, \varphi_s, f_D, \varphi_D$  – частота і фаза модульованих сейшових і модулюючих збуджувальних коливань.

Досліджені закономірності пропонуємо використовувати для збудження мікросейсмів хитної частоти в сейсмічній розвідці.

1. *Азерникова О.А.* Поверхностные и внутренние сейши озера Севан // Известия АН Армянской ССР. Науки о Земле. – 1975. – № 1. – С. 97–101.
2. *Анахов П.В.* Використання мікросейсмогенних явищ для розвантаження тектонічних напружень // Геофизический журнал. – 2014. – Т. 36, № 5. – С. 128–142.
3. *Бергъ Л.* Аральское море. Опыт физико-географической монографии / Известия Турк. Отд. Импер. Русск.

- Географич. Общ., т. V. Научные Результаты Аральской Экспедиции, вып. 9. – СПб.: Типография М.М. Стасюлевича, 1908. – 580 с.
4. ГОСТ Р 51901.13-2005 (МЭК 61025:1990). Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей. – [Действующий с 2005-05-01]. – М.: Стандарт-информ, 2005. – 16 с. – (Национальный стандарт Российской Федерации).
5. *Капустян Н.К.* Опыт сейсмических наблюдений возмущений ветра на нарушенный массив горных пород / Н.К. Капустян, А.Е. Рогожин, О.А. Сусин // Физика Земли. – 2004. – № 3. – С. 54–59.
6. *Пат.* 86894 Україна, МПК G01V 1/00. Спосіб мікросейсмічного розвідування / Анахов П.В.; винахідник та власник П.В. Анахов. – № u2013 09813; заявл. 07.08.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1.
7. *Пат.* 87564 Україна, МПК G01V 1/00. Спосіб мікросейсмічного розвідування / Анахов П.В.; винахідник та власник П.В. Анахов. – № u2013 10919; заявл. 12.09.2013; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3.
8. *Пат.* 92618 Україна, МПК G01V 1/02. Спосіб стимулювання зміщень у фрагментах сейсмоактивних розломів депресійної зони водосховища / Анахов П.В.; винахідник та власник П.В. Анахов. – № u2014 03017; заявл. 25.03.2014; опубл. 26.08.2014, Бюл. № 16.
9. *Шахова Е.В.* Экспресс-методика для определения микросейсмической активности платформенных территорий (на примере Архангельской области): Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Москва: Ин-т геологии Карел. науч. центра РАН, 2008. – 24 с.
10. *Шерифф Р.* Сейсморазведка. В 2 т. Т. 1 / Р. Шерифф, Л. Гелдарт. – М.: Мир, 1987. – 448 с.
11. *Юдахин Ф.Н.* Об использовании ветровых колебаний сооружений для сейсмического просвечивания / Ф.Н. Юдахин, Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская, Е.В. Шахова // Доклады РАН. – 2005. – Т. 402, № 2. – С. 255–259.
12. *Kodomari S.* On the Studies of the Periodic Motions in a Lake (2): Effect of the Lake Basin Shape on the Periodic Motion // Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, Series 7 (Geophysics). – 1982. – V. 7, No. 2. – P. 185–226.
13. *Langbein W.B.* Water budget / First fourteen years of lake Mead. Geological survey circular 346. – Washington: D.C., 1954. – P. 8–10.
14. *Pat.* 4,671,379 US, Int. Cl. G01V 1/40. Method and apparatus for generating seismic waves / Kennedy W.S., Blumenkranz S.J. – Appl. No.: 771, 719; Filed: 03.09.1985; Date of Patent: 09.06.1987.
15. *Rabinovich A.B.* Seiches and Harbor Oscillations / Handbook of Coastal and Ocean Engineering (ed. Y.C. Kim). – Singapore: World Scientific Publ., 2009. – P. 193–236.

## СЕЙСМИЧЕСКАЯ РАЗВЕДКА МЕТОДОМ КАЧАЮЩЕЙСЯ ЧАСТОТЫ

П. В. Анахов

Государственный университет телекоммуникаций, ул. Соломенская, 7, Киев 03110, Украина,  
e-mail: anakhov@rambler.ru

Рассматривается неустойчивость частот стоячих волн водоемов (сейш) в различных масштабах времени – от кратковременного, сопоставимого с периодом сейш, до длительного, значительно этот период превышающего. Определено, что частоту стоячих волн водного бассейна в первом случае задает фаза возбуждающего колебания, во втором – глубина водоема. Предлагаются методы сейсмической разведки, которые используют неустойчивость частот сейш – кратковременную фазомодулированную, длительную частотно-модулированную.

**Ключевые слова:** микросейсмогенное явление, фазовая модуляция сейш, качание частоты, частотная модуляция сейш.

## SEISMIC TOMOGRAPHY BY SWEEP-FREQUENCY METHOD

P.V. Anakhov

State University of Telecommunications, 7 Solomenska Str., Kyiv 03110, Ukraine, e-mail: anakhov@rambler.ru

**Purpose.** The purpose of the paper is to demonstrate the application of seiches oscillations of the water mass with unstable but manageable frequency in seismic tomography, which eliminates the excitation of elastic waves requiring expensive percussion, explosion and vibration technologies; to develop methods for seismic tomography using the property of sweep-frequency seiches.

**Design/methodology/approach.** We discovered that frequency of seiches depends on water level as well as on the phase of stimulation wave. These properties were then used in methods for conducting seismic raying of the earth's crust.

**Findings.** On the example of Lake Sevan, it was shown that depth-sweep of water, which changes the level from minimum to maximum and back, causes a corresponding long-term frequency-modulated sweep of seiches. On the example of Aral Sea, we showed that the phase shift of exciting wave with respect to the decaying seiche leads to a short-term phase-modulated sweep of a resulting wave.

**Practical value/implications.** We justified the advantages of seismic tomography using seiches: seiches allow man-made oscillation; microseisms of seiches origin are characterized by a long range; seiches modulate high-frequency microseisms, which allows us to interpret them jointly and to increase reliability of the received seismic signal; seiches allow controlled frequency sweep, making it possible to record the frequency response of an object environment.

**Keywords:** microseismogenic phenomena, phase modulation of seiches, frequency sweep, frequency modulation of seiches.

### References:

1. Azernikova O.A. *Poverhnostnye i vnutrennie sejsi ozera Sevan* [Surface and internal seiches of Lake Sevan]. *Izvestija AN Armjanskoj SSR. Nauki o Zemle* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Armenia: Earth Sciences Series], 1975, no. 1, pp. 97-101.
2. Anakhov P.V. *Vikoristannja mikrozejsmogennih javishh dlja rozvantazhennja tektonichnih napruzhen'* [Releasing of tectonic stresses by using microseismogenic phenomena]. *Geophysical Journal*, 2014, vol. 36, no. 5, pp. 128-142.
3. Berg L. *Aral'skoe more. Opyt fiziko-geograficheskoj monografii* [Aral Sea. Experience of physic-geographic monograph]. *Izvestija Turkmenskogo Otdelenija Imperatorskogo Russkogo Geograficheskogo Obshhestva, tom V. Nauchnye Rezul'taty Aral'skoj Jekspedicii*, Issue 9. Saint Petersburg, *Tipografiya M.M. Stasyulevicha*, 1908, 580 p.
4. GOST R 51901.13-2005 (MEK 61025:1990). *Menedzhment riska. Analiz dereva neispravnostej* [IEC 61025:1990. *Risk management. Fault Tree Analysis*]. Moscow, *Standartinform*, 2005, 16 p.
5. Kapustian N.K., Rogozhin A.E., Susin O.A. *Opyt sejsmicheskijh nabljudenij vozdeystvij vetra na narushennyj massiv gornij porod* [Seismic observations of the wind effect on a faulted rock mass]. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2004, no. 3, pp. 54-59.
6. Pat. 86894 Ukrajina, MPK G01V 1/00. *Sposib mikrozejsmichnogo rozviduvannja* [Method of microseismic tomography]. Anakhov P.V. № u201309813; zajavl. 07.08.2013; opubl. 10.01.2014; Bjul. № 1.
7. Pat. 87564 Ukrajina, MPK G01V 1/00. *Sposib mikrozejsmichnogo rozviduvannja* [Method of microseismic tomography]. Anakhov P.V. № u201310919; zajavl. 12.09.2013; opubl. 10.02.2014; Bjul. № 3.
8. Pat. 92618 Ukrajina, MPK G01V 1/02. *Sposib stymuljuvannja zmishhjen' u fragmjentah sjejsmoaktyvnyh rozlomiv depresijnoji zony vodoshovyshha* [Method for stimulation the displacement of fragments of seismically active faults of depressing zone of reservoir]. Anakhov P.V. № u2014 03017; zajavl. 25.03.2014; opubl. 26.08.2014, Bjul. № 16.
9. Shahova E.V. *Jekspress-metodika dlja opredelenija mikrozejsmicheskijh aktivnosti platformennyh territorij (na primere Arhangel'skoj oblasti). Avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Express method for determination the microseismic activity of platform areas (Arkhangelsk region as example). PhD]. Moscow, *Institute of Geology, Karelian Research Center RAS*, 2008, 24 p.
10. Sheriff R.E., Geldart L.P. *Sejsmorazvedka* [Seismic exploration]. Vol. 1. Moscow, *Mir Publishers*, 1987, 448 p.

11. Judahin F.N., Kapustjan N.K., Antonovskaja G.N., Shahova E.V. *Ob ispol'zovanii vetrovyh kolebanij sooruzhenij dlja sejsmicheskogo prosvechivaniya* [On the use of fluctuations of the structures by wind for seismic tomography]. *Doklady RAN*, 2005, vol. 402, no. 2, pp. 255-259.
12. Kodomari S. On the Studies of the Periodic Motions in a Lake (2): Effect of the Lake Basin Shape on the Periodic Motion. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, Series 7 (Geophysics)*, 1982, vol. 7, no. 2, pp. 185-226.
13. Langbein W.B. Water budget. In: First fourteen years of lake Mead. *Geological survey circular 346*. Washington, D.C., 1954, pp. 8-10.
14. Pat. 4,671,379 US, Int. Cl. G01V 1/40. Method and apparatus for generating seismic waves. Kennedy W.S., Blumenkranz S.J. Appl. No.: 771,719; Filed: 03.09.1985; Date of Patent: 09.06.1987.
15. Rabinovich A.B. Seiches and Harbor Oscillations. In: Handbook of Coastal and Ocean Engineering (ed. by Y. C. Kim). Singapore, *World Scientific Publ.*, 2009, pp. 193-236.

*Надійшла до редакції 29.12.2014 р.*  
*Received 29/12/2014*