

ДИСТАНЦІЙНИЙ КОНТРОЛЬ ГЛИБИНИ ВОДОЙМИ З ВИКОРИСТАННЯМ БАГАТОКАНАЛЬНОГО ДОСТУПУ ДО ПОЛІВ СЕЙШОВОГО ПОХОДЖЕННЯ

П.В. Анахов¹, С.П. Анахов²

¹Державний університет телекомунікацій, вул. Солом'янська, 7, Київ 03110, Україна,
e-mail: anakhov@rambler.ru

²Центральний державний архів зарубіжної україніки, вул. Солом'янська, 3, Київ, 03680, Україна

Варіації глибини водойми є причиною варіацій її власних (сейшових) коливань. Розроблено удосконалений метод дистанційного контролю глибини водойми, який використовує багатоканальний доступ до комплексу полів коливань сейшового походження. Розглянуто основні метрологічні характеристики методу. Чутливість приймача коливань визначається затуханням сигналу в системі водойма–приймач і обумовлює дальність дії методу. Затримка часу інтерпретації сигналу становить щонайменше інтервал, який охоплює тривалість поширення сигналу в середовищі і тривалість дискретизації півперіоду сейшових коливань. Завадостійкість системи водойма–приймач пов'язана з її здатністю розрізняти сигнали із заданою достовірністю. Випадкову похибку методу визначають за варіаціями періодів сейш, зумовленими зовнішніми причинами. Обґрунтовано можливість застосовності методу під час контролю повільних змін глибин водойм.

Ключові слова: варіації періодів сейш, поле сейшових коливань, поле мікросейсмічних коливань, поле мікробаромних коливань, фізична природа сигналу.

Вступ. Стан техногенного навантаження на території України обумовлений наявністю на територіях суміжних держав гідродинамічно небезпечних об'єктів, аварії на яких можуть мати транскордонний характер. Так, охолоджувач Курської атомної електростанції (м. Курчатова, Росія, 100 км на північ від м. Суми) розташований на заплаві р. Сейм. Унаслідок прориву дамб, якими укріплено береги, забруднювальні речовини потрапляють у відкриті водотоки, рівень забрудненості води у р. Сейм різко підвищиться, що можна зафіксувати на транскордонному створі в с. Тьоткіне [11].

Аварії на 203 українських об'єктах підвищеної небезпеки можуть зумовити надзвичайні ситуації регіонального та державного рівнів. Велика кількість таких об'єктів зосереджена в Донецькій (19 од.) і Луганській (8 од.) областях та в Автономній Республіці Крим (8 од.) [10]. Із загостренням терористичної ситуації в державі для них виникають імовірні терористичні загрози [11].

За обмеженості інформації щодо глибин віддалених водойм, зокрема під час транскордонного моніторингу гідрологічних загроз, єдиною можливістю прогнозування надзвичайної ситуації визнаний дистанційний контроль [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для організації і забезпечення захисту населення від наслідків надзвичайних ситуацій створено загальнодержавну систему зв'язку, оповіщення та інформатизації МНС України. Комплексною програмою її розвитку (від 04 березня 2004 р., № 109-р)

передбачено розроблення математичних моделей, методів, алгоритмів і програмних засобів оцінювання ризиків виникнення, прогнозування розвитку надзвичайних ситуацій.

Запропоновано дистанційний контроль глибини водойми методом, за яким здійснюють аналіз її власних (сейшових) коливань [2]. Мета методу – отримання інформації щодо водойм, безпосередній доступ до яких значно обмежений або взагалі відсутній. Позитивною рисою дистанційного контролю є можливість спостереження декількох водойм одночасно, що забезпечено багатоканальним характером створеного інформаційного поля. Багатоканальність поля визначається таким розподіленням коливань водойм:

- просторовим, пов'язаним з напрямками приходу сигналів;
- часовим, зумовленим їх амплітудно-модульованими серіями (сеансами);
- частотним, спричиненим морфометричними характеристиками водойм.

Інформаційними сигналами визначено збуджені сейшовими коливаннями мікросейсмічні хвилі, середовищем поширення коливань – земну кору.

Сейшовими коливаннями збуджуються мікробароми (розподіл атмосферного тиску над земною поверхнею) [13].

Використання під час вимірювань двох і більше інформаційних сигналів різної фізичної природи підвищує ймовірність прийняття сигналу і його правильної інтерпретації.

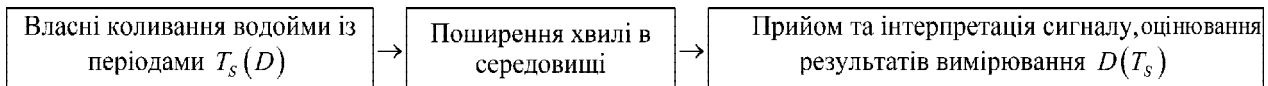


Рис. 1. Схема дистанційного контролю глибини водойми з використанням її власних коливань

Fig. 1. Scheme of remote monitoring of depth of lake using its characteristic oscillations

Мета статті – розробка удосконаленого методу дистанційного контролю глибини водойми, який використовує багатоканальний доступ до комплексу полів коливань сейшового походження.

Модель вимірювання. Об'єкт дослідження, власні коливання водойми разом із середовищем поширення хвиль – гідросферою, атмосферою та земною корою, є нелінійною динамічною системою. Ключові елементи цієї системи такі [9]:

- схема вимірювального експерименту (рис. 1);
- оцінювання необхідної і достатньої кількості інформації, яку визначає чутливість приймача коливань;
- класифікація процесу, характер якого зумовлюють затримка часу інтерпретації прийнятого сигналу, завадостійкість системи водойма – приймач і випадкова похибка методу;
- оцінювання результатів вимірювань, що полягає у розв'язанні оберненої задачі.

Внутрішньою причиною варіацій сейш є варіації глибини водойми. Це положення можна пояснити на прикладі моделі прямокутного басейну з горизонтальним дном. За модифікованою формулою Меріана, період сейш [1]

$$T(t)_S = \frac{2L(t)}{\sqrt{gD(t)}}, \quad L(t) = \text{const},$$

де $T(t)_S$ – миттєвий період сейшових коливань у момент часу t ; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; $D, L, D(t), L(t)$ – морфометричні

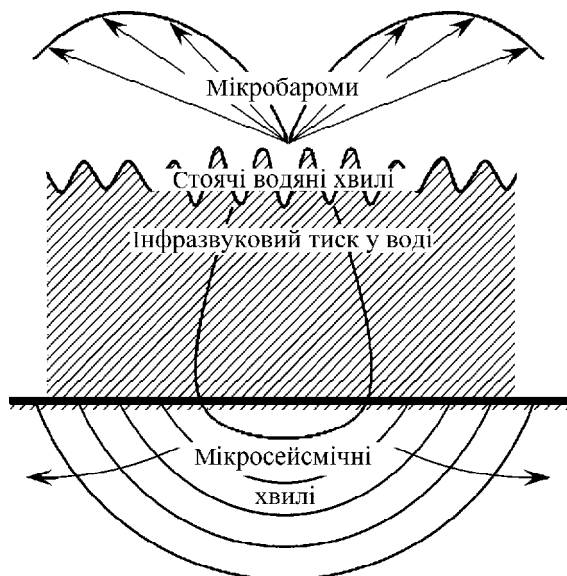


Рис. 2. Комплекс явищ, які виникають під дією стоячих водяних хвиль, у гідросфері, атмосфері та земній корі [13]
Fig. 2. Complex of phenomena triggering by standing water waves in hydrosphere, atmosphere and earth's crust [13]

характеристики водойми, а саме глибина басейну, його характерна довжина, закони їх зміни відповідно.

Опускаючись, коливання води збуджують мікросейсми, піднімаючись вгору – мікробароми (рис. 2).

Можливість кінцевої інтерпретації інформації забезпечується поширенням власних коливань водойми в середовищі: сейшових – у воді, збуджених сейшовими мікросейсмічними коливань у земній корі, мікробаричних коливань – у повітрі.

Чутливість приймача коливань. Цю характеристику визначають за затуханням сигналу в системі водойма–приймач, що обумовлює дальність дії методу.

Сейшове поле охоплює всю водну масу водойми і поступово затухає, поширюючись за межі водойми по прилеглих водних об'єктах. Дію сейш можна фіксувати вздовж потоків, що впадають у водойму або витікають з неї. Наприклад, байкальські сейші поширюються вздовж долини р. Ангара – в селах Нікола (2 км від витоків) і Підорвинський Бик (12 км від витоків) вони мають мало ослаблену амплітуду, слабкі сплески коливань у виняткових випадках помічені у пункті Михальово (38 км від витоків) [8].

21–23 жовтня 2007 р. у смузі періодів хвиль 2–14 с синхронно зареєстровано мікросейсмічне і мікробаричне поля, збуджені стоячими хвилями під час шторму в Баренцовому морі. Приймачі мікросейсмів були встановлені у сейсмічних групах станцій Акбулак і AS057-Борове (обидві – Казахстан), а мікробаром – на інфразвуковій станції IS31-Актюбинськ (Казахстан), на дистанції понад 2000 км [6].

Підвищену чутливість приймача забезпечують, використовуючи багатоканальний доступ до сигналів різної фізичної природи з просторовим розділенням коливань [3]:

$$P_{\text{res}} = 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - P_i), \quad (1)$$

де P_{res} – результуюча ймовірність прийому інформаційного сигналу; P_i – ймовірність прийому сигналу відомої фізичної природи; i – кількість каналів.

Затримка часу інтерпретації сигналу. Якщо збудити коливання у будь-якій точці середовища (рідкого, твердого або газоподібного), то внаслідок взаємодії між частинками середовища ці коливання передаватимуться від однієї точки середовища до іншої зі швидкістю, яка залежить від властивостей середовища.

Наприклад, дистанційно спостережена протягом 18 діб вересня 2006 р. швидкість поширення хвиль, збуджених діяльністю вулкана Форпід (Аляска), становила у смузі періодів 2–5 с для мікросейсмів – 2,7 км/с, для мікробаром залежно від дії полів температури і вітру – 300–340 м/с [17].

Тривалість інтерпретації сигналу (відновлення первинної функції T_S за даними вимірювань) становить

$$t_{VD} \geq t_v + t_D,$$

де t_v – тривалість поширення сигналу в середовищі.

Відновлення вихідної функції T_S , за критерієм Котельникова–Найквіста, має виконуватися за дотримання умови [14]

$$t_D \geq T_S / 2,$$

де t_D – тривалість дискретизації вимірюваного сигналу.

Завадостійкість системи водойма–приймач.

У термінах передачі–прийому неперервних (аналогових) сигналів під завадостійкістю системи розуміють її здатність розрізняти інформаційні (корисні) сигнали із заданою достовірністю за наявності завад. Завадостійкість (Noise Immunity) можна розрахувати за формулою [12]

$$NI = \lim_{t_u \rightarrow \infty} \frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} (u_R - u_T)^2 dt,$$

де t_u – тривалість сигналу; u_T , u_R – відповідно переданий та прийнятий сигнали. Різниця ($u_R - u_T$) визначає відмінність прийнятого сигналу від переданого і фізично означає заваду на вході приймача.

Метод використовує три приймачі коливань різної фізичної природи із різними шляхами по-

ширення сигналів і різними завадами, отже, різними будуть і їх сигнали на входах приймачів. У такому разі результуючу ймовірність відновлення корисного сигналу P_{res} можна розрахувати за формулою (1), де P_i – ймовірність відновлення корисного сигналу відомої фізичної природи.

Випадкова похибка методу. Цю похибку визначають за варіаціями періодів сейш, які не зумовлені змінами глибини водойми. У таблиці наведено перелік причин таких варіацій.

Випадкові похибки не можна виключити з результатів вимірювань, увівши поправки, навіть якщо відомі їх причини. Проте вплив цих похибок на результати вимірювань може бути зменшений збільшенням кількості вимірювань [7].

Зв'язок квадратичної похибки середнього арифметичного $\Delta(\overline{T_S})$ із середньою похибкою результату одиничного вимірювання $\Delta(T_S)$ описує залежність [7]

$$\Delta(\overline{T_S}) = \frac{\Delta(T_S)}{\sqrt{m}},$$

де m – кількість результатів повторних вимірювань, для яких розраховано середнє значення.

Зменшення похибки вимірювання періоду сейш забезпечується збільшенням спостережених сеансів розгойдування – затухання (повторних вимірювань), що означає збільшення тривалості спостереження сигналів відносно періоду сейш.

Висновки. Розроблено удосконалений метод дистанційного контролю глибини водойми, який використовує багатоканальний доступ до комплексу полів коливань сейшового походження. Затримка часу інтерпретації сигналу становить щонайменше інтервал, який охоплює тривалість поширення сигналу в середовищі і тривалість дискретизації півперіоду сейшових коливань. Для

Зовнішні причини варіації періодів сейш External causes of variations of seiche periods

Варіації	Пояснення
1. Збудження хвилею з періодом, близьким до сейшового [1]	Для інтервалу часу власне збудження коливань
2. Зміни характерної довжини профілю, на якому відбуваються коливання, внаслідок зміння напрямку осі коливань [5]	У результаті зміни напрямку барометричного градієнта або напрямку вітру [5]
	При обіганні сейшової хвилі навколо амфідромічної точки (збігається із вузлом сейші), зумовленому обертальним рухом Землі [15]
3. Одночасні зміни довжини і глибини профілю, на якому відбуваються коливання [5]	Унаслідок денівеляції водної поверхні від згинно-нагінних явищ, через потоки, що впадають у водойму або витікають з неї, зливи [4]
	За зміни морфометричних характеристик (наприклад, унаслідок катастрофи, під час гідротехнічного будівництва)
4. Інтерференція із сейшами такого саме або іншого періоду [5]	Унаслідок фазової модуляції затухаючих сейш у разі їх розгойдування [3]

зменшення випадкової похибки вимірювань тривалість спостереження сигналів має значно перевищувати період сейш.

Отже, запропонований метод придатний для контролю повільних змін глибини, зокрема, за надмірної фільтрації води через земляне ложе водосховища, тіло підпірної гідропоруди (як, наприклад, фільтрація за 2 роки (станом на 14.02.1994) 5 млн м³ забрудненої радіоактивними ізотопами води в ґрунт із хвостосховища Олімпік (Olympic), Австралія [16]).

Подяка. Автори висловлюють щирю подяку В.М. Шуману за підтримку і цінні зауваження до рукопису статті.

1. Анахов П.В. Використання мікросейсмогенних явищ для розвантаження тектонічних напружень // Геофизический журнал. – 2014. – Т. 36, № 5. – С. 128–142.
2. Анахов П.В. Вимірювання глибини водою методом власних коливань / П.В. Анахов, О.В. Анахова // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 1. – С. 36–40.
3. Анахов П.В. Сейсмічна розвідка методом хитної частоти // Геоінформатика. – 2015. – № 2. – С. 46–51.
4. Арсеньєва Н.М. Сейши на озерах СРСР / Н.М. Арсеньєва, Л.К. Давыдов, Л.Н. Дубровина, Н.Г. Конкина. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1963. – 184 с.
5. Берг Л. Аральское море. Опыт физико-географической монографии / Известия Турк. Отд. Импер. Русск. Географич. Общ. Т. 5. Научные Результаты Аральской Экспедиции. Вып. 9. – СПб.: Типография М.М. Стасюлевича, 1908. – 580 с.
6. Дубровин В.И. Регистрация и параметризация микросейсм и микробаром по данным сети станций НЯЦ РК / В.И. Дубровин, А.А. Смирнов // Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан. – 2009. – Вып. 2. – С. 172–177.

7. Ивашкина Д.А. И снова о погрешностях // Физика. – 2007. – № 17. – Режим доступа: <http://fiz.1september.ru/article.php?ID=200701702> (дата обращения: 14.09.2015).
8. Кравец Т.П. Распространение байкальских сейш по реке Ангаре / Т.П. Кравец, А.С. Торопец // Сейши на озерах поверхностные и внутренние. – Л.: Наука, 1970. – С. 56–66.
9. Мачехин Ю.П. Модель измерения параметров нелинейных динамических систем / Ю.П. Мачехин, Ю.С. Курской // Системы обработки информации. – 2012. – Вып. 1. – С. 169–175.
10. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2009 році. – К.: МНС України, 2009. – 252 с.
11. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2014 році. – К.: [б.в.], 2015. – 365 с.
12. Панфілов І.П. Теорія електричного зв'язку / І.П. Панфілов, В.Ю. Дирда, А.В. Капацін. – К.: Техніка, 1998. – 328 с.
13. Табулевич В.Н. Влияние штормовых вибраций на землетрясения / В.Н. Табулевич, Е.Н. Черных, В.А. Потапов, Н.Н. Дреннова // Природа. – 2002. – № 10. – С. 12–16.
14. Топильский В.Б. Схемотехника аналогово-цифровых преобразователей. – М.: Техносфера, 2014. – 288 с.
15. Шулейкин В.В. Физика моря. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Наука, 1968. – 1083 с.
16. Chronology of uranium tailings dam failures. Mode of access: <http://www.wise-uranium.org/mdafu.html> (дата обращения: 14.09.2015).
17. Haney M.M. Infrasonic ambient noise interferometry from correlations of microbaroms // Geophysical research letters. – 2009. – Vol. 36, iss. 19. – L19808, doi:10.1029/2009GL040179.

Надійшла до редакції 08.10.2015 р.

ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ГЛУБИНЫ ВОДОЕМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОКАНАЛЬНОГО ДОСТУПА К ПОЛЯМ СЕЙШЕВОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

П.В. Анахов¹, С.П. Анахов²

¹Государственный университет телекоммуникаций, ул. Соломенная, 7, Киев 03110, Украина, e-mail: anakhov@rambler.ru

²Центральный государственный архив зарубежной украиники, ул. Соломенная, 3, Киев 03680, Украина

Вариации глубины водоема являются причиной вариаций ее собственных (сейшевых) колебаний. Разработан усовершенствованный метод дистанционного контроля глубины водоема, который использует многоканальный доступ к комплексу полей колебаний сейшевого происхождения. Рассмотрены основные метрологические характеристики метода. Чувствительность приемника колебаний определяется затуханием сигнала в системе водоем–приемник и обуславливает дальность действия метода. Задержка времени интерпретации сигнала составляет, как минимум, интервал, включающий продолжительность распространения сигнала в среде и продолжительность дискретизации полупериода сейшевых колебаний. Помехоустойчивость системы водоем–приемник определяется ее способностью различать сигналы с заданной достоверностью. Случайную погрешность метода определяют по вариациям периодов сейш, обусловленным внешними причинами. Обоснована возможность применимости метода при контроле медленных изменений глубин водоемов.

Ключевые слова: вариации периодов сейш, поле сейшевых колебаний, поле микросейсмических колебаний, поле микробаромных колебаний, физическая природа сигнала.

REMOTE MONITORING OF LAKE DEPTH USING MULTI-CHANNEL ACCESS TO FIELDS OF SEICHES ORIGIN

P.V. Anakhov¹, S.P. Anakhov²

¹State University of Telecommunications, 7 Solomenska Str., Kyiv 03110, Ukraine, e-mail: anakhov@rambler.ru

²Central State Archives of Foreign Archival Ukrainian, 3 Solomenska Str., Kyiv 03680, Ukraine

Purpose. Given limited information on depths of remote lakes, particularly in transboundary monitoring of hydrological threats, the only possibility of alarm forecasting may be remote monitoring. The purpose of the paper is develop a method of remote monitoring of the lake depth.

Design/methodology/approach. Variations of the depth of lake cause variations of its characteristic oscillations (seiches). The basic principles of the method are stability of periods of damped seiches restricted by timetable of one series of oscillations, and multi-channel manifestation of oscillations of seiches origin.

Findings. We examined primary metrological performance of the geophysical method of depth monitoring. The receiver, sensitivity of oscillations is based on the signal damping in the “lake–receiver” system and determines further application effect of the method. Time delay of signal interpretation is at least an interval, including the duration of signal propagation in the medium and the duration of sampling of seiches half-period. Noise immunity of the “lake–receiver” system is based on its capability to discern signals with adjusted reliability. Accidental error of the method is defined by variations of seiches periods determined by external causes.

Practical value/implications. The application of a multi-channel access to signals of different physical nature with space multiplexing of oscillations provides greater receiver sensitivity and noise immunity of the “lake–receiver” system. To decrease accidental measurements error, the duration of signal observations must significantly exceed the seiches period. So, the proposed method serves for monitoring slow depth changes, particularly in over-filtration of water through the lake soil bed, the body of a dam (for example, as in filtration into soil during 2 years (as of 14.02.1994) of 5 mln. m³ of water contaminated radioactive isotopes from the Olympic tailing dump, Australia.

Keywords: variations of periods of seiches, field of seiches oscillations, field of microseisms oscillations, field of microbaroms oscillations, physical nature of signal.

References:

1. Anakhov P.V. Releasing of tectonic stresses by using microseismogenic phenomena. *Geofizicheskiy zhurnal*, 2014, vol. 36, no. 5, pp. 128-142 (in Ukrainian).
2. Anakhov P.V., and Anakhova O.V. Measuring of reservoir depth by method of characteristic oscillations. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, 2015, no. 1, pp. 36-40 (in Ukrainian).
3. Anakhov P.V. Seismic tomography by sweep-frequency method. *Geoinformatika*, 2015, no. 2, pp. 46-51 (in Ukrainian).
4. Arsen'eva N.M., Davydov L.K., Dubrovina L.N., Konkina N.G. *Sejsi na ozerah SSSR*. Leningrad, izdatel'stvo Leningradskogo universiteta, 1963, 184 p. (in Russian).
5. Berg L. Aral'skoe more. Opyt fiziko-geograficheskoy monografii. *Izvestiya Turkmenskogo Otdeleniya Imperatorskogo Russkogo Geograficheskogo Obshchestva, tom 5. Nauchnye Rezul'taty Aral'skoj Jekspedicii*, Issue 9. Saint Petersburg, Tipografiya M.M. Stasyulevicha, 1908, 580 p. (in Russian).
6. Dubrovin V.I., Smirnov A.A. Recording and parametrization of microseisms and microbaroms using data of NNC RK monitoring network. *NNC RK Bulletin*, 2009, iss. 2, pp. 172-178 (in Russian).
7. Ivashkina D.A. I snova o pogreshnostyah. *Fizika*, 2007, no. 17. Available at: <http://fiz.1september.ru/article.php?ID=200701702> (Accessed 14 September 2015) (in Russian).
8. Kravec T.P., Toropov A.S. Rasprostraneniye bajkal'skih sejsm po reke Angare. In: *Sejsi na ozerah poverhnostnye i vnutrennie*. Leningrad, Nauka, 1970, pp. 56-66 (in Russian).
9. Machehkin Yu.P., Kurskoy Yu.S. Model for measuring of nonlinear dynamic systems parameters. *Systemy obrobky informacii*, 2012, iss. 1 (99), pp. 169-175 (in Russian).
10. Nacionalna dopovid pro stan tjehnogjennoji ta pryrodnoji bjezpjeky v Ukrajinu u 2009 roci. Kyiv, State Emergency Service of Ukraine, 2009, 252 p. (in Ukrainian).
11. Nacionalna dopovid pro stan tjehnogjennoji ta pryrodnoji bjezpjeky v Ukrajinu u 2014 roci. Kyiv, State Emergency Service of Ukraine, 2015, 365 p. (in Ukrainian).
12. Panfilov I.P., Dyrda V.Ju., Kapacin A.V. Teoriya elektrychnoho zviazku. Kyiv, Tekhnika, 1998, 328 p. (in Ukrainian).
13. Tabulevich V.N., Chernykh E.N., Potapov V.A., Drennova N.N. Influence of storm vibrations on earthquakes. *Priroda*, 2002, no. 10, pp. 12-16.
14. Topil'skij V.B. Skhemotekhnika analogovo-tsifrovyykh preobrazovateley. Moscow, Tehnosfera, 2014, 288 p. (in Russian).
15. Shulejkin V.V. Fizika morja. Moscow, Nauka, 1968, 1083 p. (in Russian).
16. Chronology of uranium tailings dam failures. Available at: www.wise-uranium.org/mdafu.html (Accessed 14 September 2015).
17. Haney M.M. Infrasonic ambient noise interferometry from correlations of microbaroms. *Geophysical research letters*, 2009, vol. 36, iss. 19, L19808, doi:10.1029/2009GL040179.

Received 08/10/2015