

МОНІТОРИНГ НЕБЕЗПЕЧНИХ ТЕХНОГЕННИХ ТА ПРИРОДНИХ ЯВИЩ В ІНФРАЗВУКОВОМУ ДІАПАЗОНІ

О. І. ЛЯЩУК, Є. В. КАРЯГІН

*Головний центр спеціального контролю ДКА України
alex_liashchuk@mail.ru; eugenix@ukr.net*

ВСТУП

Для інфразвуку характерне мале поглинання в різних середовищах. Наслідком цього є можливість реєстрації атмосферних сигналів від подій, що відбулися на великому віддаленні від пункту спостереження. Від деяких явищ інфразвукові хвилі можуть огинати Землю кілька разів і проявлятися у вигляді збурення атмосферного тиску декілька діб підряд. Прикладами таких глобальних подій можуть слугувати виверження вулкану Кракатау 1883 р., вибухи Тунгуського метеориту 1908 р., та термоядерного заряду на Новій Землі 1961 р.. Спектр природних і техногенних явищ, що генерують інфразвук достатньо широкий. Основними джерелами, генеруючими інфразвук, є полярні саява, запуск ракет, вулкани, падіння космічних тіл, шторми, урагани, землетруси, лавини, пожежі, ядерні та хімічні вибухи, інше.

Інфразвукові спостереження в світі отримали великий поштовх у зв'язку з розвитком ядерної зброї і його випробуванням. Роботи зі створення систем інфразвукового моніторингу найбільш активно проводилися в США і СРСР. У рамках Договору про всеосяжну заборону ядерних випробувань (ДВЗЯВ) ряд інфразвукових станцій в світі об'єднані в мережу Міжнародної системи моніторингу (МСМ). Згідно з Договором у складі МСМ на території земної кулі встановлено 60 інфразвукових станцій. Найпотужнішою подією останнього часу, зареєстрованою мережею інфразвукових станцій МСМ, є вибух метеориту поблизу м.Челябінська 15.02.2013 р.

В Україні завдання контролю дотримання ДВЗЯВ покладена на Головний центр спеціального контролю (ГЦСК), на озброєнні якого наявні засоби інфразвукового моніторингу, розміщені на території Житомирської, Хмельницької, Одеської областей. Також інфразвукові засоби встановлені на українській антарктичній станції (УАС) «Академік Вернадський». Система інфразвукових спостережень протягом останнього десятиріччя отримала розвиток, розширився діапазон завдань моніторингу техногенних та природних явищ. У зв'язку з цим стає актуальним є питання визначення можливості застосування технічних засобів ГЦСК для вирішення таких завдань.

АПАРАТУРА ТА МЕТОДИКА СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Реєстрація інфразвукових сигналів у ГЦСК ведеться за допомогою акустичних станцій К-304А, які мають у своєму складі мікробарографи конденсаторного типу із частотною смугою 0.003 - 12 Гц. Режими чутливості станції – 1, 10, 100 Па [1]. Вимірювана інформація у цифровому вигляді надходить до персонального комп'ютеру для подальшої обробки.

При вимірі інфразвуку доводиться мати справу з поганим відношенням сигнал-шум. З метою його покращення використовується система групування (далі - мало апертурна акустична група, або МААГ). Для цього у кожному пункті спостереження встановлено 3 і

більше акустичних станцій, що рознесені між собою на відстані 100-200 метрів одна від одної [2]. Мала апертура обумовлена наявною територією, на якій можливе встановлення акустичних станцій. При сприятливих умовах таку систему можливо доповнювати акустичними станціями із взаємним розташуванням на відстанях 1-3 кілометри для реєстрації низькочастотної складової в інфразвуковому сигналі.

До входів кожного з мікробарографів, через об'єм усереднення, підключено завадозахисний пристрій (ЗЗП) типу «Павук» [1-3.]. ЗЗП відіграє основну роль у процесі зниження завад від приземного вітру та турбулентності. Із виходів мікробарографів електричні сигнали по кабелям передаються до аналого-цифрового перетворювача і далі до робочої станції, де здійснюється накопичення інформації у визначеному форматі, її первинна обробка та передача до центру даних ГЦСК. В центрі даних проводиться повна обробка інформації, що включає оцінки часових, частотних та просторових характеристик сигналів [4]. На рис. 1. показано типову структурну схему МААГ.

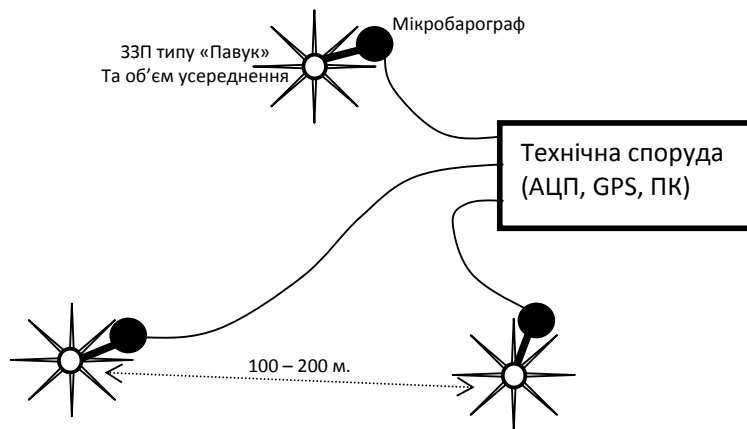


Рис. 1. Типова структурну схему МААГ

Важливою характеристикою групи мікробарографів є відгук групи на сигнал залежно від кута його приходу. Ця реакція залежатиме від конфігурації групи (схеми розміщення датчиків на площині), лінійних розмірів групи і кількості датчиків.

Внаслідок несиметричного розташування датчиків, результат відгуку буде нерівномірним для різних кутів приходу фронту інфразвукової хвилі. Для плоского фронту хвилі рішення можна описати наступним виразом [4,5]:

$$f(r, t) = e^{j(\omega t - kr)} = e^{j\omega(t - pr)} \quad (1)$$

де: ω – частота;

p - повільність;

k - хвильове число;

r - позиційний вектор;

t - різниця часу між r датчиком і опорним датчиком.

Тоді для горизонтально розміщених датчиків групи буде знайдено рішення вирівнювання диференціальних фаз. У разі вертикального падіння елементарної хвилі на групу ми отримуємо відсутність різниці часу приходу хвилі, тобто буде одночасний запис на всі елементи групи. Відгук для групи з N елементів буде:

$$R(\omega, p) = \frac{1}{N} \left| \sum_{j=1}^N e^{-j\omega(p r_j)} \right|^2 \quad (2)$$

Відгук групи в області ІЗ частот моделюється в адекватно вибраному просторі повільностей. Частотний спектр потужності повільності може бути визначений шляхом сумування сигнальних складових на певній багатоканальній послідовності даних. Згідно [6,7], спектр буде:

$$p(\omega, p) = \left| \sum_n^N [A_n(\omega) e^{j a_n(\omega)}] e^{-j\omega p r_n} \right|^2, \quad (3)$$

де: N - кількість датчиків розміщених відповідно до позиційного вектору r_n ;

$A_n(\omega) e^{j a_n(\omega)}$ - результат перетворення Фур'є.

Цей вираз можливо інтерпретувати як відгук групи на ту інфразвукову хвилю, що проходить через групу та когерентну в кожній точці. В даному випадку усі різниці часів вступу інфразвукової хвилі на конкретному датчику перетворені в частотну область за допомогою перетворення Фур'є, і підміняються фазовими зміщеннями.

Результат перетворення Фур'є $A_n(\omega) e^{j a_n(\omega)}$ несе наступну інформацію:

$e^{j a_n(\omega)} = \Delta \sum_{j=0}^{M-1} e^{j\omega t_j}$ - про фазу M числа відліків при частоті дискретизації Δ ;

$A_n(\omega) = \sum_{j=0}^{M-1} A(t_j)$ - про сигнальну амплітуду.

Частотний спектр потужності повільності оцінюється для усього діапазону повільностей фронту інфразвукової хвилі і для усього частотного діапазону. Характерна (домінуюча) частота і вектор повільності відповідатиме максимуму енергетичного спектру, що дозволяє ототожнювати джерело. Уявна швидкість визначається довжиною P-вектору, азимут на джерело визначається відносно напрямку на північ.

$$|P| = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} = \sqrt{\left(\frac{\cos \phi}{c}\right)^2 + \left(\frac{\sin \phi}{c}\right)^2} = \frac{1}{c}, \quad (4)$$

Це співвідношення визначає зв'язок між значенням повільності фронту інфразвукової хвилі і відповідному їй напрямку [5-9].

Автоматичне виявлення корисних сигналів в багатоканальній реалізації безперервних хвилевих форм може проводитися з використанням критерію статистики Фішера. При цьому значення статистичного показника Фішера - це масштабована міра сигнальної послідовності, що зростає за наявності когерентних хвилевих форм. У разі наявності запису некогерентного інфразвукового фону, значення показника буде низьким.

Для довільного числа каналів і "вікна" що складається з довільного числа відліків, значення статистики Фішера можна розрахувати за допомогою співвідношення [6]:

$$F = \frac{T(C-1)}{C(T-1)} \frac{\sum_{i=1}^T \left[\sum_{c=1}^C x_{ct} \right]^2}{\sum_{i=1}^T \sum_{c=1}^C x_{ct}^2 - \frac{1}{c} \sum_{i=1}^T \left[\sum_{c=1}^C x_{ct} \right]^2}, \quad (5)$$

Де: T- кількість відліків в часовому вікні;

C- кількість станцій в групі;

x_{ct} – значення відліків хвилових форм у вікні;

F - значення функції для вікна T.

Виграш такого підходу у наступному:

1. автоматичне виявлення і оцінка параметрів сигналів можливі з малим числом акустичних каналів (від трьох включно);
2. мала кількість помилкових тривог та пропусків корисних сигналів;
3. легка програмна реалізація.

РЕЄСТРАЦІЯ ІНФРАЗВУКОВИХ ЯВИЩ

Роботи щодо створення інфразвукових систем групування в ГЦСК розпочаті у 2006 році. За минулий час накопичена база еталонних сигналів від природних та техногенних явищ, що дає змогу в більшості випадків правильно ідентифікувати подію.

Основна маса зареєстрованих сигналів носить вибуховий характер та має вибухоподібну форму обвідної. Це пов'язано з особливістю розташування пунктів реєстрації в районах, де розвинена гірничодобувна промисловість і проводиться велика кількість вибухів. Інфразвукові сигнали служать індикатором для правильної ідентифікації сейсмічних подій, зокрема в системі розпізнавання вибух/землетрус. Максимальний радіус реєстрації промислових вибухів (у силу їх обмеженої потужності) за сприятливих погодних умов сягає 200 км і більше (Курська магнітна аномалія).

Окрім промислових вибухів реєструвалися потужні вибухи, викликані техногенними катастрофами на території України та суміжних держав (вибух газопроводу поблизу м.Тарасі, вибухи на військових складах в Україні, Словаччині, Румунії). Відстані до від події до пункту спостереження склали 400 – 1000 км.

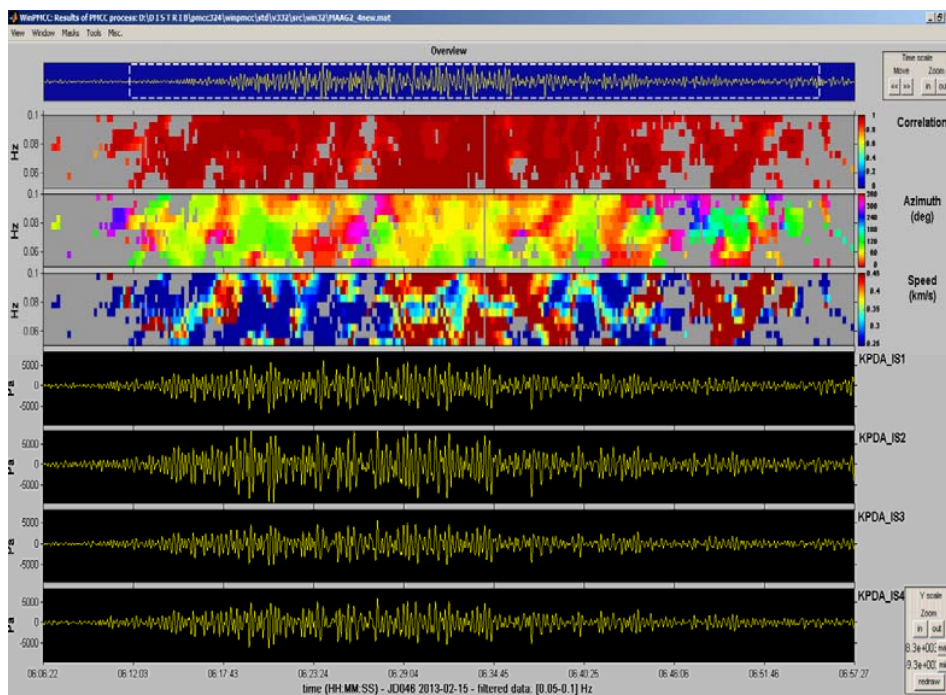


Рис.2. Сигнал від Челябінського метеориту зареєстрований 15 лютого 2013 року. Червоним кольором зверху на рис.2. визначена область максимальної когерентності на конкретній частоті. Далі, зверху вниз: площини азимут/частота, швидкість/частота, хвильові форми кожного елемента МААГ.

Особливо цікавим типом вибухових сигналів є космічні тіла, що вибухають в атмосфері Землі. Так 3 вересня 2004 року над Антарктикою на висоті 50 км вибухнув метеорит, потужність вибуху якого, за нашими оцінками, склала 15-25 кт. Відстань від місця вибуху до УАС склала 2300 км. Наступний вибух боліду зареєстрований в районі кордону Україна-Словаччина у 2009 році. Самим потужним за весь час спостережень був сигнал від вибуху боліду поблизу м. Челябінськ, Росія, 15 лютого 2013 року. Сигнал був чітко зафіксований чотирьох елементною МААГ, що розміщена в Хмельницькій області на відстані 2600 км від місця події (рис.2). Розрахована потужність вибуху склала 150 кт. На офіційному сайті ДВЗЯВ (www.ctbto.org) повідомляється, що сигнал від цієї події зареєстровано всією наявною на сьогодні мережею інфразвукових станцій МСМ. Так на німецькій антарктичній станції «Немайр» інфразвуковою групою МСМ зафіксовано сигнал від вибуху, що дійшов до станції по малому півкругу, а через чотири години – по великому. Таким чином сигнал від Челябінського метеориту обійшов усю Земну кулю.

Другим типом техногенних сигналів, що часто реєструються і мають свій специфічний вигляд, який легко ідентифікувати є транспортні сигнали. Наземний транспорт реєструється на відстанях сотні метрів, повітряний – десятки кілометрів.

Серед сигналів природного походження за кількістю лідирують мікробаромі, викликані циклонічною діяльністю. Рівень мікробаромі прямо пропорційний ступеню хвилювання океану в місцях посиленої циклонної діяльності. За наявності групи мікробарографів можливо визначення напряму на область зародження мікробаромі для відслідковування переміщення циклонів. Крім того моніторинг штормового інфразвуку проводиться на УАС з метою визначення його впливу на психофізіологічний стан зимівників, адже його рівень в регіоні в певні періоди року перевищує значення 90 дБ.

До специфічних інфразвукових сигналів природного походження, зареєстрованих технічними засобами ГЦСК відносяться також грози, лавини, землетруси. Різна кількість енергії, що виділяється при цих подіях спричиняє і різні відстані, на яких можуть реєструватися сигнали. Якщо для перших двох явищ це десятки кілометрів, то інфразвукові сигнали від землетрусів реєструвалися на відстанях у декілька тисяч кілометрів. Так на УАС «Академік Вернадський» зареєстрований інфразвуковий сигнал від землетрусу в морі Скоша 4 серпня 2003 року із $M=7.6$, відстань від місця події до пункту реєстрації склала 1800 км (рис.3.). Цікавим є те, що даний землетрус викликав у регіоні цунамі, і в даному випадку інфразвук виявився його провісником.

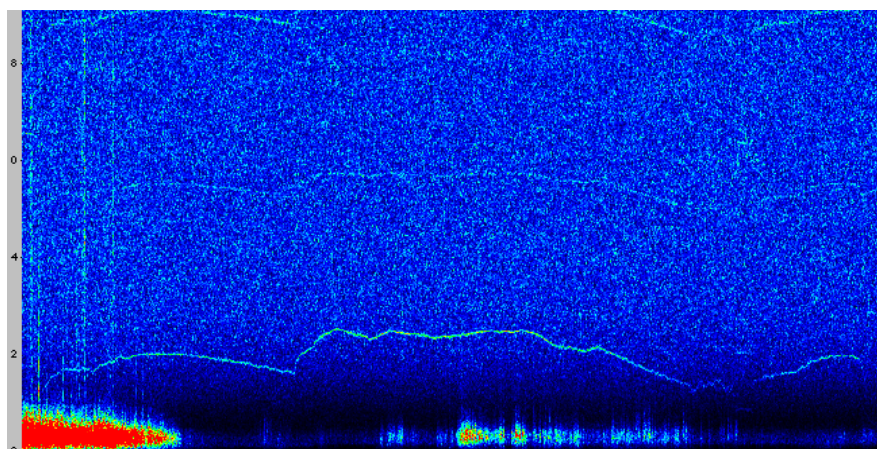


Рис.3. Спектрограма інфразвукового фону, тривалість – 18 годин. По центру знизу сигнал від землетрусу в морі Скоша 04.08.2003.

ВИСНОВКИ

Таким чином, технічними засобами ГЦСК реєструється широкий спектр інфразвукових явищ, різноманітних за своєю природою. Відстані, на яких можуть реєструватися акустичні сигнали різняться від енергії джерела і можуть мати як локальний так і планетарний масштаби.

Застосування інфразвукових систем групування разом із математичним апаратом обробки вимірюваної інформації дозволяє отримувати нові дані про джерело інфразвуку, раніш недоступні для аналізу, виявляти події, амплітуда яких знаходиться на рівні фону, проводити направлений моніторинг явищ, ідентифікувати їх, а при наявності декількох груп в регіоні – здійснювати локацію джерела.

Моніторинг техногенних явищ за допомогою інфразвукової системи дає можливість швидкого та адекватного реагування на надзвичайні події.

Використання інфразвукових систем групування у складі багатофункціональних геофізичних комплексів дає додатковий якісний інструмент для вивчення природних явищ та їх взаємодії.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Изделие К304А. Техническое описание. Часть 1. НЕЯИ.406222.001 ТО, 1974*
2. *Ю. А. Гордиенко, Е. В. Карягин, А. И. Лящук, А. И. Солонец. Построение систем акустического группирования для реализации инфразвукового мониторинга. Зб.наук. пр. ХУ ПС. – Х. : ХУ ПС. – 2006. – Вип. №3 (52). – С. 36 – 42.*
3. *І.М.Сауцук, В.В.Стрінада, І.Г.Качалін, О.І.Лящук, Є.В.Карягін. Використання малоапертурної акустичної групи в складі міжнародної системи моніторингу. - Збірник наукових праць. ЖВІ НФУ. Випуск 4. 2010-С.115-122.*
4. *Машков О.А., Кирилюк В.А., Качалін І.Г., Карягін Є.В. Оцінка характеристик джерела інфразвукових коливань техногенного походження малоапертурною акустичною групою// Зб. наук. пр. ІПМЕі, Модельовання та інформаційні технології , К.-2005 - Вип. №29 - с. 80 – 87*
5. *Hein Haak, Laslo Evers: Design of infrasound detection and parameter estimation systems. June-september 2003. KNMI, infrasound technology workshop, US San Diego, October 2003*
6. *H.W. Haak and G.J. de Wilde. Scientific report: WR 96-06 Microbarograph systems for the infrasonic detection of nuclear explosions. De Bilt 1996.*
7. *Le Pichon, E. Blanc, A.Hauchecome: Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies. ISBN 978-1-4020-9507 Springer Dordrecht Heidelberg London New York 2010.*
8. *John V. Olson, C.A.L. Szuberla, C.R. Wilson, K.M. Arnoult and D. Osborne: Bias and uncertainty in parameter estimation in infrasound arrays. Infrasound Group, University of Alaska Fairbanks, infrasound technology workshop, US San Diego, October 2003*
9. *Laslo G.Evers: The inaudible symphony: on the detection and source identification of atmospheric infrasound. ISBN 978-90-71382-55-0 Gildeprint B.V., Enschede. 2008.*